

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический Институт
институт
Тепловые электрические станции
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Е.А. Бойко
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССОВ ШЛАКОВАНИЯ
И ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА
П-49 В СОСТАВЕ ЭНЕРГОБЛОКА К-500-240 «НАЗАРОВСКОЙ ГРЭС»

тема

13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 Энергоэффективные технологии производства электрической и
тепловой энергии

код и наименование магистерской программы

| | | | | |
|----------------------|---------------|------------|----------------|------------------------|
| Научный руководитель | _____ | _____ | _____ | <u>С.Р. Янов</u> |
| | подпись, дата | должность, | ученая степень | инициалы, фамилия |
| Выпускник | _____ | | | <u>Д.С. Колесов</u> |
| | подпись, дата | | | инициалы, фамилия |
| Рецензент | _____ | _____ | _____ | <u>П.Ю. Гребеньков</u> |
| | подпись, дата | должность, | ученая степень | инициалы, фамилия |
| Нормоконтролер | _____ | | | <u>П.В. Шишмарев</u> |
| | подпись, дата | | | инициалы, фамилия |

Красноярск 2017

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Система технической диагностики процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата П-49 в составе энергоблока К-500-240 Назаровской ГРЭС» содержит 79 страниц текстового документа, 32 иллюстрации, 42 использованных источника.

КОТЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ, ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА, ШЛАКОВАНИЕ, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ, КОЭФФИЦИЕНТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, ОЧИСТКА, РАЗРАБОТКА, РАСЧЕТ, ТЕПЛООБМЕН.

Цель работы:

Разработка проектных, прогнозных и управленческих решений для обеспечения тепловой эффективности и эксплуатационной надежности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольного котла П-49 в составе седьмого энергоблока Назаровской ГРЭС.

На базе усовершенствованной методики и алгоритма был разработан перечень необходимых исходных данных, требуемых для определения уровня загрязнения и шлакования как отдельной поверхности нагрева, так и котла в целом.

На основе необходимых исходных данных выбрана методика проведения экспериментально-расчетных исследований для их получения.

Использование программного обеспечения в экспериментально-расчетных исследованиях позволит оценить изменения коэффициента тепловой эффективности, как поверхности в целом, так и отдельных ее элементов в зависимости от качества топлива, режимных параметров, очистки, состояния и состава вспомогательного оборудования парового котла. Все вышеперечисленное позволит создать банк данных значений коэффициентов тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева при сжигании широкого класса углей на котлах разных типов, практическое использование которого позволяет повысить точность определения площади поверхности нагрева с обеспечением необходимого регулировочного диапазона при создании новых, а также модернизации, реконструкции и наладке действующих паровых котлов.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| 1 Описание объекта..... | 6 |
| 1.1 Топочная камера..... | 6 |
| 1.2 Пароперегреватель первичного пара..... | 10 |
| 2 Недостатки в процессе эксплуатации котельного агрегата П-49, после технического перевооружения..... | 26 |
| 2.1 Анализ причин повреждения котельных агрегатов в процессе эксплуатации | 26 |
| 2.2 Влияние шлакования и загрязнения поверхностей нагрева на надежность работы котельного агрегата..... | 28 |
| 2.3 Влияние наружных отложений на показатели и работу котла..... | 39 |
| 2.4 Основные характеристики и экспертная оценка шлакующих свойств углей..... | 42 |
| 2.5 Варианты решения и их обоснование по борьбе со шлакованием поверхностей нагрева котельного агрегата П-49..... | 48 |
| 3 Разработка методики исследования процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла П-49..... | 55 |
| 3.1 Разработка методики и алгоритма определения интенсивности шла- кования и загрязнения поверхностей нагрева парового котла в режиме реального времени..... | 55 |
| 3.2 Формирование исходных данных, необходимых для определения интенсивности загрязнения полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева..... | 59 |
| 4 Построение математической модели..... | 65 |
| 4.1 Внешний вид программы оперативного контроля коэффициента тепловой эффективности..... | 65 |
| Выводы по главе..... | 68 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 69 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 70 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Система технической диагностики процессов шлакования и загрязнения котельного агрегата П-49..... | 73 |

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы загрязнения и шлакования поверхностей нагрева пылеугольных котлов по сегодняшний день сохраняют свою актуальность, несмотря на огромный вклад в исследования парогенераторов и углей. Так же большой опыт проектирования и эксплуатации котельного оборудования при сжигании различных углей. Традиционные проблемы характеризуются большим экономическим ущербом, связанным с образованием шлаковых отложений из-за несовершенства конструкций котлов, методов их расчета и контроля. К числу новых задач относятся: освоение новых и нетрадиционных технологий сжигания топлива; улучшение экологических показателей путем изменения качества топлива, применением добавок и угольных смесей; сжигание непроектных углей, необходимость управления системами комплексной очистки поверхностей нагрева.

Статистический анализ видов и причин отказов паровых котлов при сжигании твердых органических топлив показывает, что одной из основных причин аварийных остановов котельных агрегатов является низкая надежность работы полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева, вследствие их интенсивного шлакования и загрязнения. В первую очередь это вызвано особенностями компоновки и жесткими температурными условиями работы поверхностей нагрева. В связи с этим существенно возрастает роль научно-обоснованного подхода при выполнении проектных расчетов, наладке и технической диагностике эксплуатационных режимов полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева паровых котлов.

Одним из определяющих факторов эффективного проектирования современных энергетических котельных агрегатов является нахождение рациональных конструктивных характеристик и компоновочных решений поверхностей нагрева, обеспечивающих высокий уровень их тепловой эффективности при работе средств очистки и надежности эксплуатации. Выбор таких решений зависит во многом от вида сжигаемого топлива, характера теплообмена, ряда конструктивных и режимных параметров.

В настоящее время для оценки тепловосприятости поверхностей нагрева котельных агрегатов при решении проектных задач используется коэффициент тепловой эффективности (Ψ), обобщенный по результатам стендовых и промышленных тепловых испытаний котельных агрегатов, рекомендации по выбору которого представлены в «Нормах теплового расчета паровых котлов» (НТР). Однако, как показывает опыт эксплуатации, значения коэффициентов тепловой эффективности, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений, как следствие, приводит к повышению проектных рисков и ограничению номинальной паропроизводительности котла вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева. В этой связи работа по исследованию и определению тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева при различных конструктивных и

режимных параметрах работы паровых котлов при сжигании твердых органических топлив является особенно актуальной.

Актуальность: Элементы поверхностей нагрева являются главными в котельном агрегате и их исправность, в первую очередь, определяет экономичность и надежность котельной установки. Работоспособность тепловых электрических станций в значительной мере зависит от надежности котельного оборудования. Большинство отказов происходит из-за повреждений труб поверхностей нагрева. Основная причина повреждений заключается в тепловой неравномерности, перегревах и ускоренном истощении запаса длительной прочности металла. Тепловая неравномерность является следствием неравномерности тепловосприятия. Неравномерность тепловосприятия связана с неоднородными распределениями температуры и скорости продуктов сгорания и циркулирующего теплоносителя.

Локальное или общее увеличение теплоотдачи от продуктов сгорания и снижение теплоотдачи к теплоносителю вызывают режимы ухудшенного теплообмена и перегревы металла выше расчетной или предельно допустимой температуры.

Образование отложений в котлах наносит экономический ущерб, снижает безопасность эксплуатации и ухудшает условия труда. Экономический ущерб может быть связан:

- с ограничением мощности и уменьшением выработки электроэнергии и тепла;
- с остановом котла на проведение расшлаковки и очистки;
- с ростом температуры уходящих газов и снижением экономичности;
- с затратами на проведение стояночной расшлаковки и аппаратами очистки в процессе работы;
- с повреждением поверхностей нагрева при работе аппаратов очистки (термошок, эрозийный износ) и падающими шлаковыми образованиями;
- с ограничением круга допустимых углей, и, как следствие, более высокими затратами на топливо.

Используемая на станциях ручная расшлаковка трудоемка и опасна;

В процессе пылеугольного сжигания в топке могут образовываться отложения, различающиеся по структуре, площади распространения и размерам.

Объект исследования: полурadiaционные и конвективные поверхности нагрева пылеугольного котельного агрегата П-49 Назаровской ГРЭС, в составе седьмого энергоблока.

Предметом исследования: являются характеристики тепловой эффективности поверхностей нагрева пылеугольного парового котла.

Цель работы: разработка проектных, прогнозных и управленческих решений для обеспечения тепловой эффективности и эксплуатационной надежности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольного котла.

1 Описание объекта

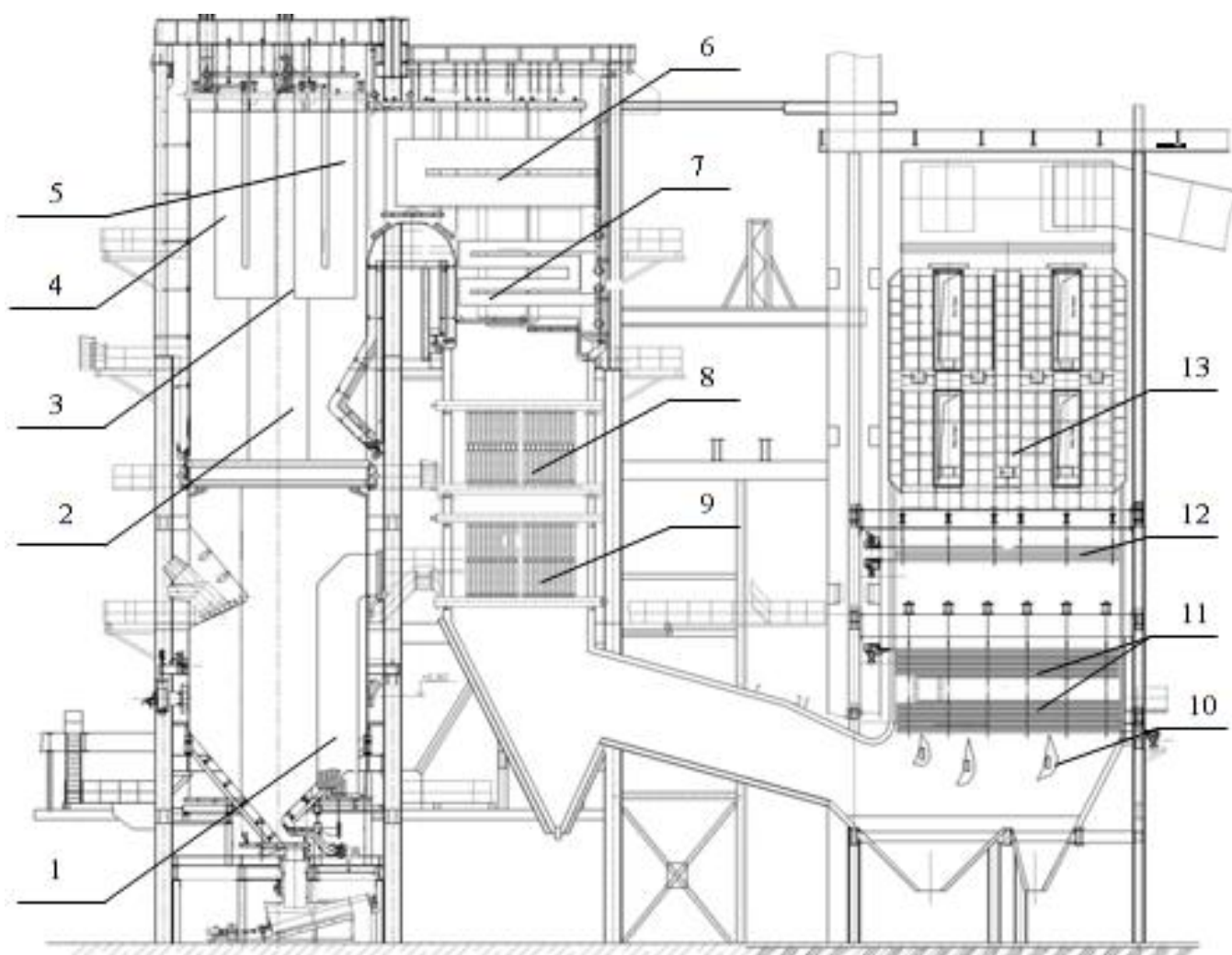
Прямоточный котел П-49 изготовлен в 1967 г. на Заводе им. Орджоникидзе (г. Подольск) и предназначен для работы в блоке с турбиной К-500-240 мощностью 500 МВт. В 2011...2013 гг. по проекту ОАО «ЗИОМАР» и ООО «Компания «НТВ-энерго» выполнено техническое перевооружение котла на НТВ технологию сжигания и твердое шлакоудаление. Котел П-49 сверхкритического давления прямоточного типа с однократным промежуточным перегревом пара, состоит из двух корпусов с трехходовой компоновкой, работающих независимо друг от друга. Общий вид корпуса после технического перевооружения приведен на рисунке 1.1.

1.1 Топочная камера

Топочная камера является первым (подъемным) газоходом. В верхней части топки расположены ширмовые пароперегреватели первичного пара 1, 2 и 3 ступеней. В опускном газоходе по ходу газов расположены ширмовые пароперегреватели первичного пара 4 и 5 ступеней, ширмовые пароперегреватели вторичного пара третьей, второй и первой ступеней. В третьем (подъемном) газоходе расположены (по ходу газов) экономайзер высокого давления, сетевой экономайзер (экономайзер низкого давления) и воздухоподогреватель. Технические характеристики котла и корпуса приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики котла и корпуса

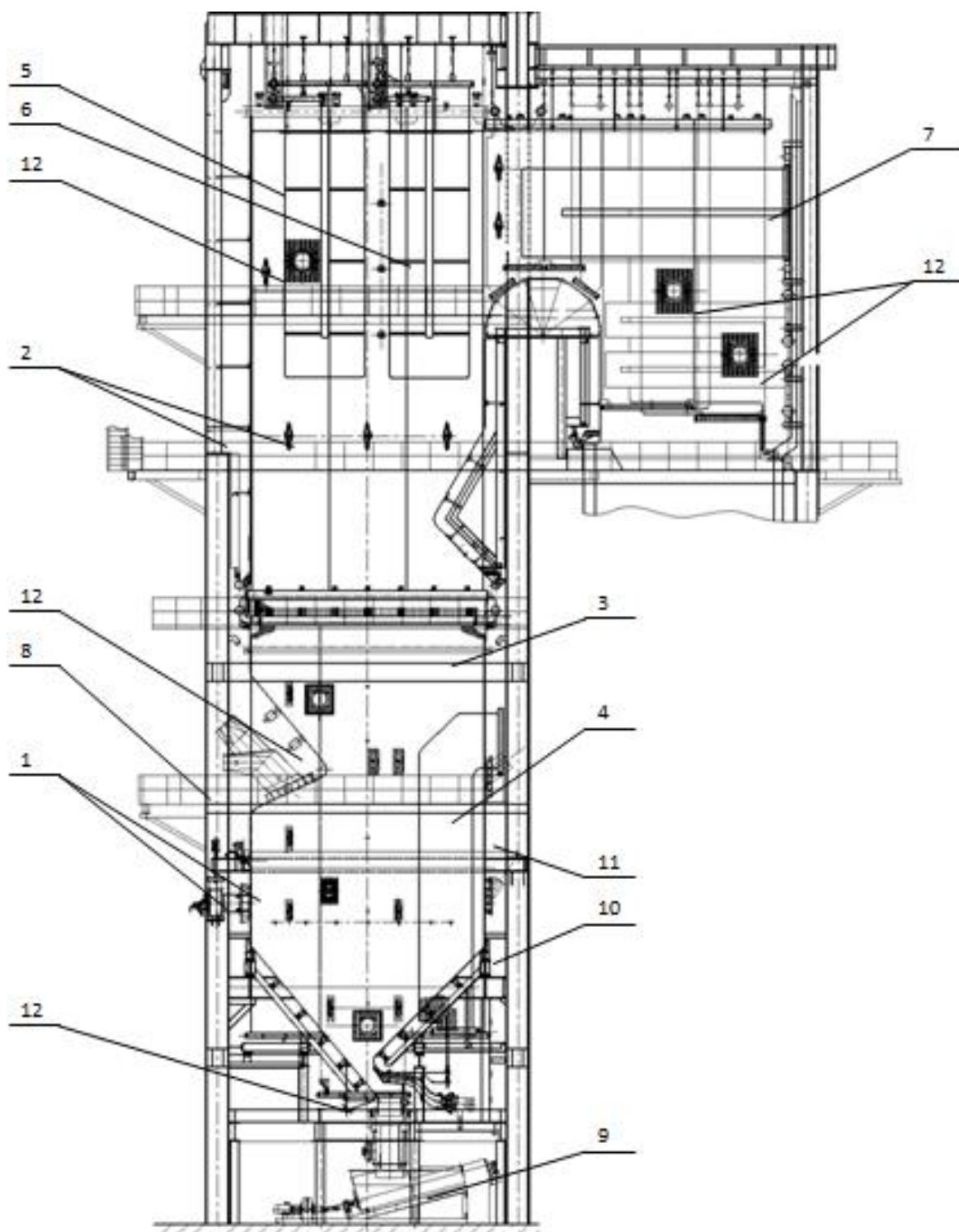
| Наименование | Обозначение | Размерность | Значение |
|--|-------------|---------------------|----------|
| 1. Паропроизводительность котла | $D_{пп}$ | т/час | 1600 |
| 1.1. Паропроизводительность корпуса | $D_{пп}$ | т/час | 800 |
| 2. Давление пара за пароперегревателем первичного пара | P | кгс/см ² | 255 |
| 3. Температура питательной воды | $t_{пв}$ | °C | 241 |
| 4. Температура перегретого пара | $T_{пп}$ | °C | 545 |
| 5. Расход вторичного пара котла | $D_{пв}$ | т/час | 1380 |
| 5.1. Расход вторичного пара корпуса | $D_{пв}$ | т/час | 690 |
| 6. Давление вторичного пара на входе | $P_{вх}$ | кгс/см ² | 42,0 |
| 7. Давление вторичного пара на выходе | $P_{вых}$ | кгс/см ² | 40,2 |
| 8. Температура вторичного пара на входе | $t_{вх}$ | °C | 298 |
| 9. Температура вторичного пара на выходе | $t_{вых}$ | °C | 545 |
| 10. Коэффициент полезного действия (брутто) | η | % | 90,69 |



1 – ШНРЧ – ширмы НРЧ; 2 – НРЧ (газоплотное исполнение); 3 – СРЧ (гладкотрубное исполнение); 4 – ШПП 1 – ширмовый первичный пароперегреватель 1-ый ступени; 5 – ШПП 2, 3 – ширмовые первичные пароперегреватели 2-й и 3-й ступеней; 6 – ШПП 4, 5 - ширмовые первичные пароперегреватели 4-й и 5-й ступеней; 7 – ШВП 3 - ширмовый вторичный пароперегреватель 3-й ступени; 8 – ШВП 2 - ширмовый вторичный пароперегреватель 2-ой ступени; 9 – ШВП 1 – ширмовый вторичный пароперегреватель 1-ый ступени; 10 – вставки выравнивающие; 11 – ЭКВД - экономайзер высокого давления; 12 – ЭКНД - экономайзер низкого давления; 13 – ТВП – трубчатый воздухоподогреватель

Рисунок 1.1 – Общий вид котла П-49 НГРЭС после технического перевооружения на НТВ-технологию сжигания

Топка открытого типа, призматической формы. Общий вид топки одного корпуса приведен на рисунке 1.2.



1 – НРЧ; 2 – СРЧ; 3 – защитные экраны стыка НРЧ и СРЧ; 4 – внутритопочные ширмы; 5, 6, 7 – ШПП 1, 2, 3, 4, 5; 8 – ПУГ; 9 – СНД; 10, 11 – сопла третичного дутья нижнего/среднего яруса; 12 – ремонтные лазы

Рисунок 1.2 – Общий вид топки котла П-49

Размеры топки в плане (по осям экранных труб) сохранены первоначальными: ширина и глубина топки равна соответственно 20000 и 8180 мм.

Нижняя часть топки (НРЧ) экранирована газоплотными панелями НРЧ, состоящими из труб $\varnothing 32 \times 6$ 12Х1МФ с вваркой полосы между ними. Шаг труб в панелях составляет 48 мм.

Фронтальная и задняя стены НРЧ состоят из 12 панелей каждая с индивидуальными входными (нижними) коллекторами и общими выходными коллекторами (1 коллектор объединяет 6 панелей одной стороны котла).

Каждый боковой экран НРЧ состоит из трех панелей с индивидуальными входными (нижними) коллекторами и общими выходными

В нижней части топки фронтальная и задняя экраны НРЧ образуют скаты «холодной» воронки, которые перекрывают друг друга в плане (по осям экранных труб) на 108 мм, формируя устье для выхода шлака из топки и подачи третичного воздуха через систему нижнего дутья.

В средней части топки панели фронтальной стены НРЧ образуют аэродинамический выступ с вылетом в топку на 2680. Фронтальной аэродинамический выступ предназначен для формирования вихревой зоны топки.

Внутри вихревой зоны топки установлены 10 внутритопочных ширм Г-образной формы, перпендикулярно заднему экрану, каждая ширма представляет собой сварную панель из 40 труб $\varnothing 32 \times 6$ 12Х1МФ, шаг 48 мм. Ширмы устанавливаются между панелями заднего экрана НРЧ.

Задняя стена топки выше отметки +22,000, перевал и фронтальная часть опускной КШ экранированы 8 негазоплотными панелями СРЧ, состоящими из труб $\varnothing 32 \times 6$ 12Х1МФ, шаг труб в панелях 38 мм. Панели разделены на два потока при помощи двух общих входных и двух общих выходных коллекторов.

В средней части топки панели заднего экрана СРЧ образуют аэродинамический выступ в топку на 1800 мм (по осям труб), предназначенный для улучшения аэродинамики газового потока на выходе из топки. Центр аэродинамического выступа находится на отм. +24,370 м.

Фронтальная стена топки над НРЧ и потолок над топкой экранированы 8 негазоплотными панелями ВРЧ состоящими из труб $\varnothing 32 \times 6$ 12Х1МФ, шаг труб в панелях 38 мм. Панели так же разделены на два потока при помощи двух общих входных и двух общих выходных коллекторов.

Боковые стены топки выше отм. +22,000 м экранированы панелями СРЧ. Каждая боковая стена состоит из трех панелей, общего входного и общего выходного коллектора.

Стык НРЧ – СРЧ от отм. +21,137 м до отм. +22,049 м закрывается защитными экранами. В топке установлено 6 экранов (по 2 на фронтальной и задней стенах топки и по 1 на боковых), каждый экран представляет собой ширму из 10 труб $\varnothing 32 \times 6$ 12Х1МФ.

Экраны НРЧ опираются на рамный каркас и расширяются вверх, входные коллекторы подвешены к рамному каркасу. Жесткость стен обеспечивается при помощи поясов жесткости на отм. +12,980 м, 14,690 м, 19,425 м.

Задний экран СРЧ оперт на дополнительные металлоконструкции, которые в свою очередь закреплены на каркасе котла и расширяется вниз в топке и опускном газоходе.

Боковые экраны СРЧ и фронтальной экран ВРЧ подвешены к каркасу и металлоконструкциям потолочного перекрытия и расширяются вниз.

Топка оснащена необходимым количеством смотровых лючков, в нижней и средней частях топки на боковых стенах расположены ремонтные лазы.

Топка оборудована необходимым количеством площадок, помостов и лестниц.

1.2 Пароперегреватель первичного пара

По характеру тепловосприятия пароперегреватель первичного пара является пароперегревателем радиационно-конвективного типа.

Радиационно-конвективными поверхностями нагрева являются ширмовые пароперегреватели 1, 2, 3 ступеней. Конвективная часть пароперегревателя представлена ширмовыми пароперегревателями 4, 5 ступеней, экранами поворотной конвективной шахты (боковые стены, потолок, задняя стена) и подвесными трубами опускного газохода показаны на рисунке 1.3.

ШПП 1, 2, 3 расположены в верхней части топки. ШПП 1 состоит из двадцати вертикальных ширм расположенных в один ряд с шагом 972 мм (шаг между центральными ширмами – 782 мм, шаг между крайней ширмой и стеной топки 871 мм). Каждая ширма 1-ой ступени состоит из 36 U-образных змеевиков и двух коллекторов Ø159×36мм, 15X1М1Ф (входной и выходной). Два крайних змеевика выполнены из труб Ø32×6мм, 12X18Н12Т, внутренние змеевики – из труб Ø32×7мм, 12X1МФ. Схема нагрева – прямоток.

ШПП 2, 3 расположены в один ряд за ширмами первой ступени на выходе дымовых газов в поворотный газоход. В ряду 36 ширм, 9 крайних ширм являются ширмами ШПП 2 и включены по схеме противотока, 9 средних ширм с каждой стороны котла являются ширмами ШПП 3 и включены по схеме прямотока. Шаг между ширмами 540мм, расстояние между центральными ширмами – 566мм. Конструктивно ШПП 2, 3 выполнены аналогично ШПП 1, за исключением типа труб змеевиков. Все змеевики ширм второй ступени изготовлены из труб Ø32×7мм, 12X1МФ; десять лобовых змеевиков третьей ступени в обогреваемой зоне изготовлены из трубы Ø32×6,5мм, 12X18Н12Т, в необогреваемой части – из трубы Ø32×7,5мм, 12X1МФ. Двадцать шесть внутренних змеевиков изготовлены из трубы Ø32×7,5мм, 12X1МФ.

ШПП 1, 2, 3 подвешены тягами к металлоконструкциям потолочного перекрытия.

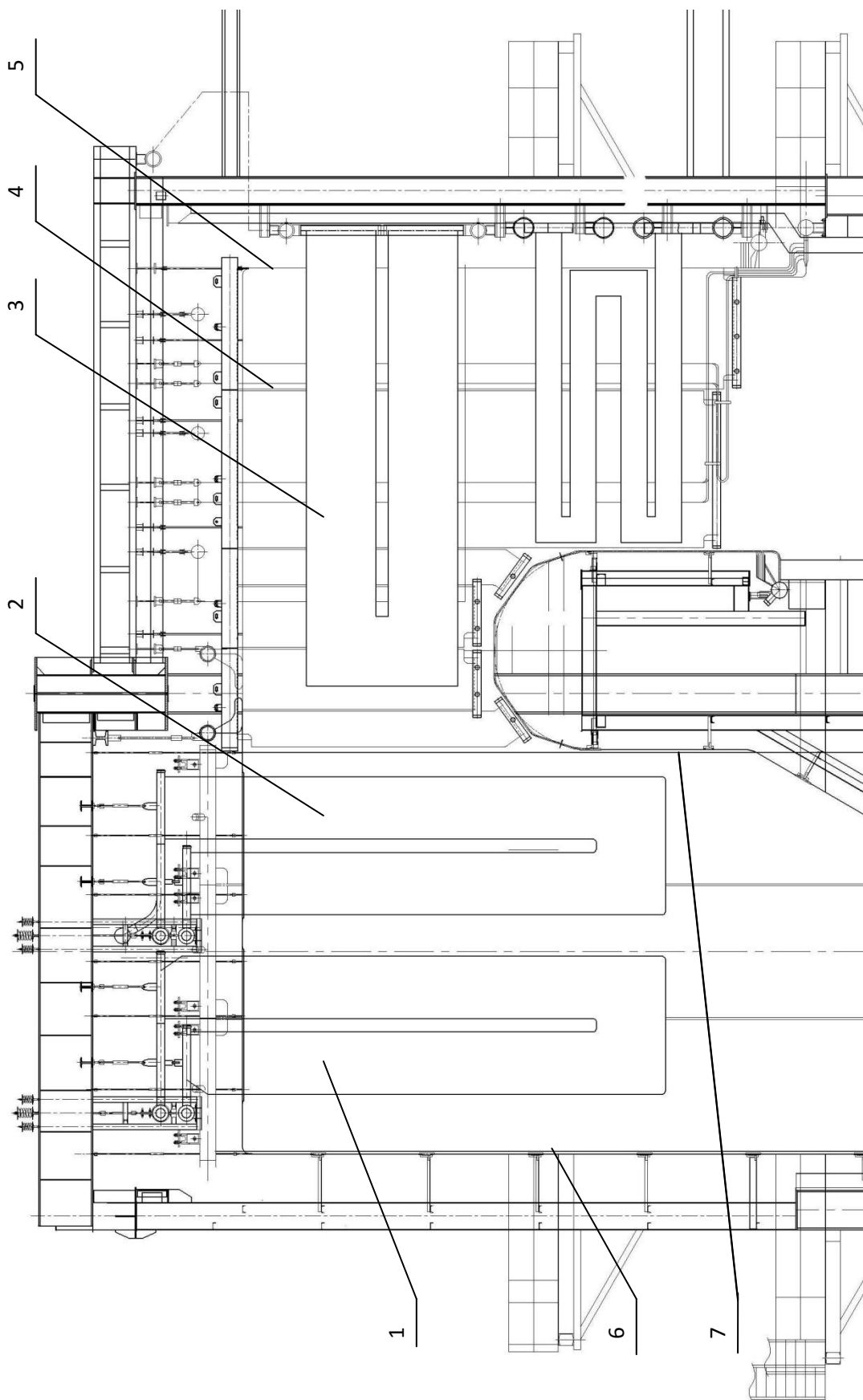
ШПП 4, 5 расположены в один ряд в верхней части поворотной камеры над опускным газоходом параллельно боковым стенам. Пакет состоит из 38

ширм, 9 крайних ширм с каждой стороны являются ширмами 4 ступени, 20 центральных ширм являются ширмами пятой ступени. ШПП 4 включены по схеме прямотока, ШПП 5 – противотока. Шаг ширм – 504 мм.

Крепление ШПП 4, 5 осуществляется при помощи подвесных труб опускного газохода, которые с двух сторон охватывают ширмы. Подвесные трубы состоят из 76 секций, разделенных на два потока. Каждая секция состоит из шести труб $\varnothing 32 \times 7,5$ мм 12Х1МФ расположенных в три ряда и одного входного коллектора $\varnothing 76 \times 10$ мм 12Х1МФ. Раздача среды к входным коллекторам выполняется от двух раздающих коллекторов $\varnothing 325 \times 45$ 12Х1МФ (по одному на поток). На отметке +38,900 м трубы разных секций одного ряда заведены в коллектор $\varnothing 273 \times 40$ 12Х1МФ (всего 6 коллекторов по числу рядов).

Боковые стены поворотного газохода экранированы панелями пароперегревателя. Каждая стена закрывается 4 негазоплотными панелями, состоящими из труб $\varnothing 32 \times 6$ мм 12Х1МФ, шаг труб – 36 мм. Нижние (входные) коллектора панелей ($\varnothing 168 \times 28$ мм 12Х1МФ) являются индивидуальными, верхний (выходной) коллектор (труба $\varnothing 325 \times 50$ мм 15Х1М1Ф) является общим для стены. Панели боковых стен включены каждая в свой поток.

Потолок и задняя стена поворотного газохода экранированы негазоплотными панелями, выполненными из труб $\varnothing 32 \times 6$ мм 12Х1МФ с шагом 36 мм, составляющими общую конструкцию и разделенную на два потока. Каждый поток имеет индивидуальный входной коллектор ($\varnothing 325 \times 50$ мм 15Х1М1Ф) и индивидуальный выходной ($\varnothing 325 \times 50$ мм 15Х1М1Ф).



1 – ШПП 1 – ширмовый первичный пароперегреватель 1-й ступени; 2 – ШПП 2, 3 – ширмовые первичные пароперегреватели 2-й и 3-й ступеней; 3 – ШПП 4, 5 – ширмовые первичные пароперегреватели 4-й и 5-й ступеней; 4 – подвесные трубы ОГ; 5 – задняя стенка и потолок поворотной камеры; 6 – ВРЧ – верхняя радиационная часть с потолочным экраном; 7 – задняя стенка СРЧ.

Рисунок 1.3 – Общий вид ШПП 1, 2, 3, 4, 5

1.3 Пароперегреватель вторичного пара

По характеру тепловосприятия пароперегреватель вторичного пара является конвективным, разбит на три ступени, представляющие собой пакеты ширм, расположенных в опускной конвективной шахте котла.

Общий вид ШВП 1, 2, 3 приведен на рисунке 1.4.

По ходу газов ширмы расположены в следующем порядке: ШВП 3, ШВП 2, ШВП 1.

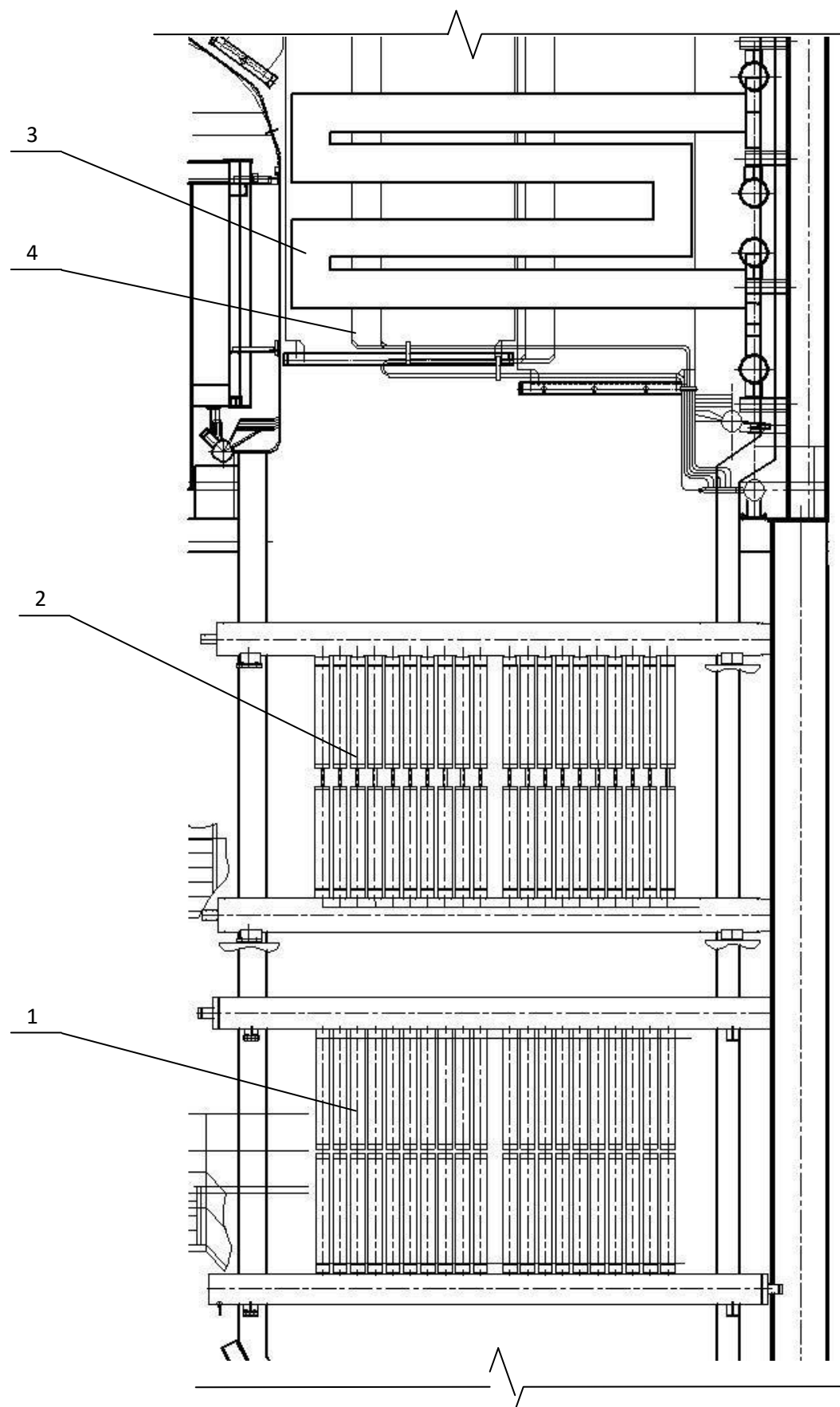
ШВП 3 состоит из 38 блоков двойных ширм, расположенных в верхней части опускного газохода параллельно боковым стенам и разделенных на 4 потока. Все блоки включены по схеме прямотока, шаг между ширмами 252 мм. Каждая ширма в блоке представляет собой ленту, состоящую из 10 W-образных змеевиков, верхняя петля (входная часть) – труба $\varnothing 42 \times 4$ мм 12X1МФ, нижняя петля (выходная часть) – труба $\varnothing 42 \times 4$ мм, сталь 12X18Н12Т.

ШВП 1 и ШВП 2 установлены в газоходе в два ряда, навстречу друг другу, параллельно фронту котла. В каждом ряду расположено 20 ширм. Ширмы каждой ступени разделены на четыре потока. Шаг между ширмами – 242 мм.

Конструктивно ШВП 1 и ШВП 2 выполнены аналогично и состоят из 26-и змеевиков: змеевики ширм 1-й ступени изготовлены из трубы $\varnothing 42 \times 4$ мм сталь 12X1МФ, змеевики ширм 2-ой ступени изготовлены из трубы $\varnothing 42 \times 3,5$ мм сталь 12X1МФ.

Входной и выходной коллекторы ширм 1-ой ступени изготовлены из трубы $\varnothing 194 \times 15$ мм сталь 12X1МФ. Входной и выходной коллекторы ширм 2-ой ступени изготовлены из трубы $\varnothing 194 \times 11$ мм сталь 12X1МФ.

ШВП 3, аналогично ШПП 4, 5, подвешен на подвесных трубах опускного газохода. ШВП 1, 2 опираются на охлаждаемые воздухом балки.



1 – ШВП 1; 2 – ШВП 2; 3 – ШВП 3; 4 – подвесные трубы ОГ
Рисунок 1.4 – Общий вид ШВП 1, 2, 3

1.4 Подъемный газоход

Подъемный газоход выполнен в виде двух симметричных шахт, соединенных двумя перепускными наклонными газоходами с общей опускной конвективной шахтой.

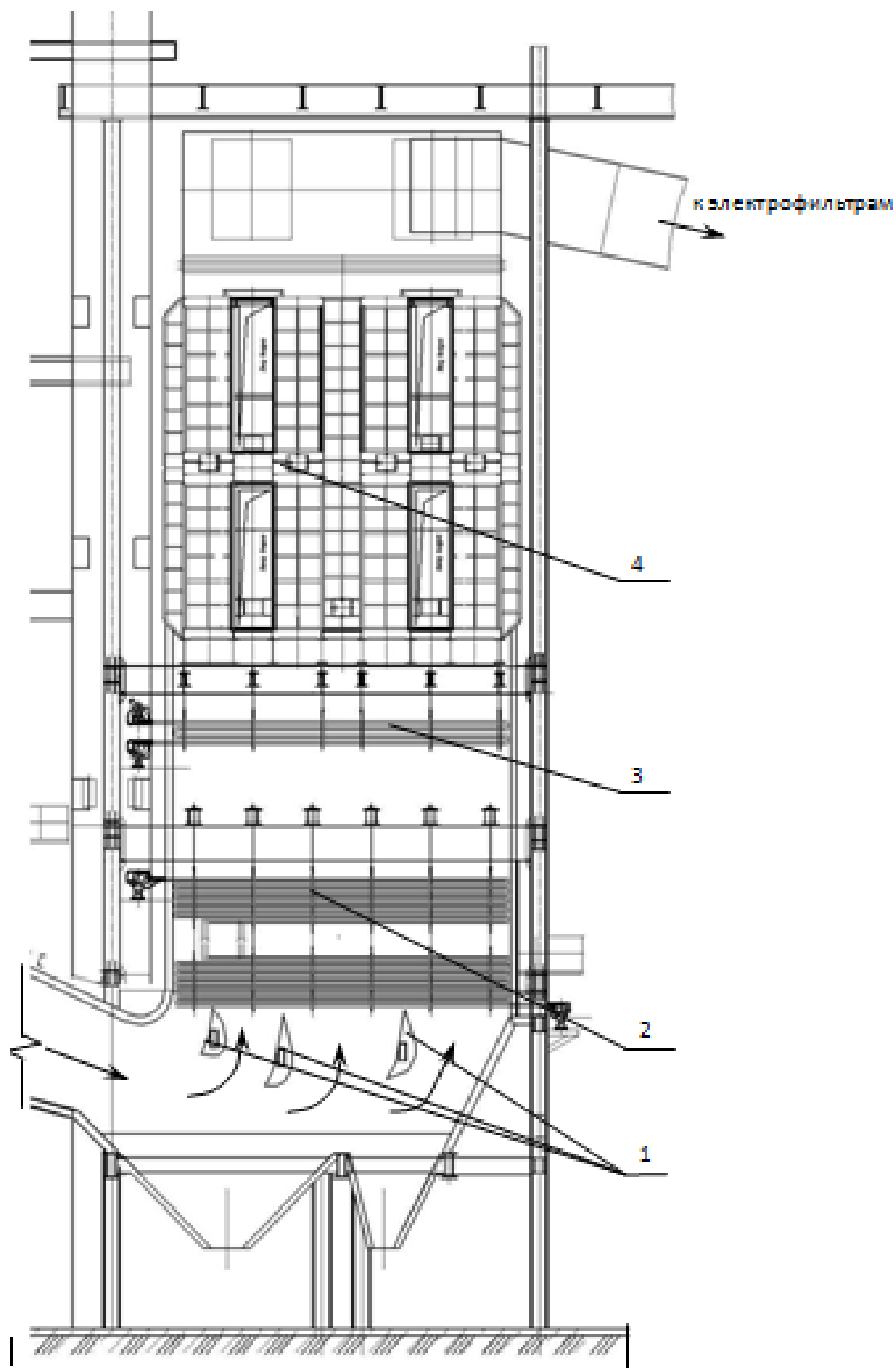
В каждом подъемном газоходе (по ходу движения газов) установлены блоки ВЭК высокого давления, блоки ВЭК низкого давления, двухходовой трубчатый воздухоподогреватель.

ВЭК высокого давления разделен на два потока (по числу шахт). Каждый поток состоит из трех блоков, выполненных из труб $\varnothing 25 \times 4$ мм Сталь 20. Блоки потока объединены общим входным ($\varnothing 325 \times 50$ мм 12Х1МФ) и выходным ($\varnothing 325 \times 50$ мм 12Х1МФ) коллекторами. Шаг труб в пакете по вертикали 40 мм. Блоки подвешены к балкам каркаса тягами.

ВЭК низкого давления установлен с целью снижения температуры уходящих газов и включен в тепловую схему турбины блока №7. ВЭК НД разделен на два потока (по числу шахт). Каждый поток состоит из трех блоков, выполненных из труб $\varnothing 32 \times 4$ мм Сталь 20. Блоки потока объединены общим входным и выходным коллекторами ($\varnothing 273 \times 16$ мм Сталь 20). Шаг труб в пакете по вертикали 50 мм. Блоки подвешены к балкам каркаса тягами.

Трубчатый воздухоподогреватель является последней поверхностью нагрева по ходу дымовых газов. ТВП каждой подъемной конвективной шахты состоит из двух ступеней, каждая ступень состоит из 8 блоков, выполненных из труб $\varnothing 40 \times 1,5$ мм, установленных в шахматном порядке. Для выравнивания потока воздуха, проходящего через воздухоподогреватели, на уровне входных окон ТВП выполнены перемычки по воздушной стороне.

Общий вид подъемной конвективной шахты приведен на рисунке 1.5.



- 1 – система выравнивания дымовых газов; 2 – экономайзер высокого давления
3 – экономайзер низкого давления; 4 – трубчатый воздухоподогреватель

Рисунок 1.5 – Общий вид подъемной конвективной шахты

1.5 Система выравнивания потока дымовых газов перед ВЭК

Для выравнивания потока дымовых газов на входе в подъемную конвективную шахту (по ходу дымовых газов) устанавливается система выравнивания потока дымовых газов.

Система представляет собой 6 (по 3 на шахту) аэродинамических вставок, установленных последовательно по ходу газов в бункере подъемной конвективной шахты.

Каждая вставка представляет собой конструкцию, приближенную в профиле к аэродинамическому крылу. Стенки вставки со стороны набегающего потока выполнены из листа 10 мм 20Х23Н13, задние стенки – из листа 5 мм 20Х23Н13.

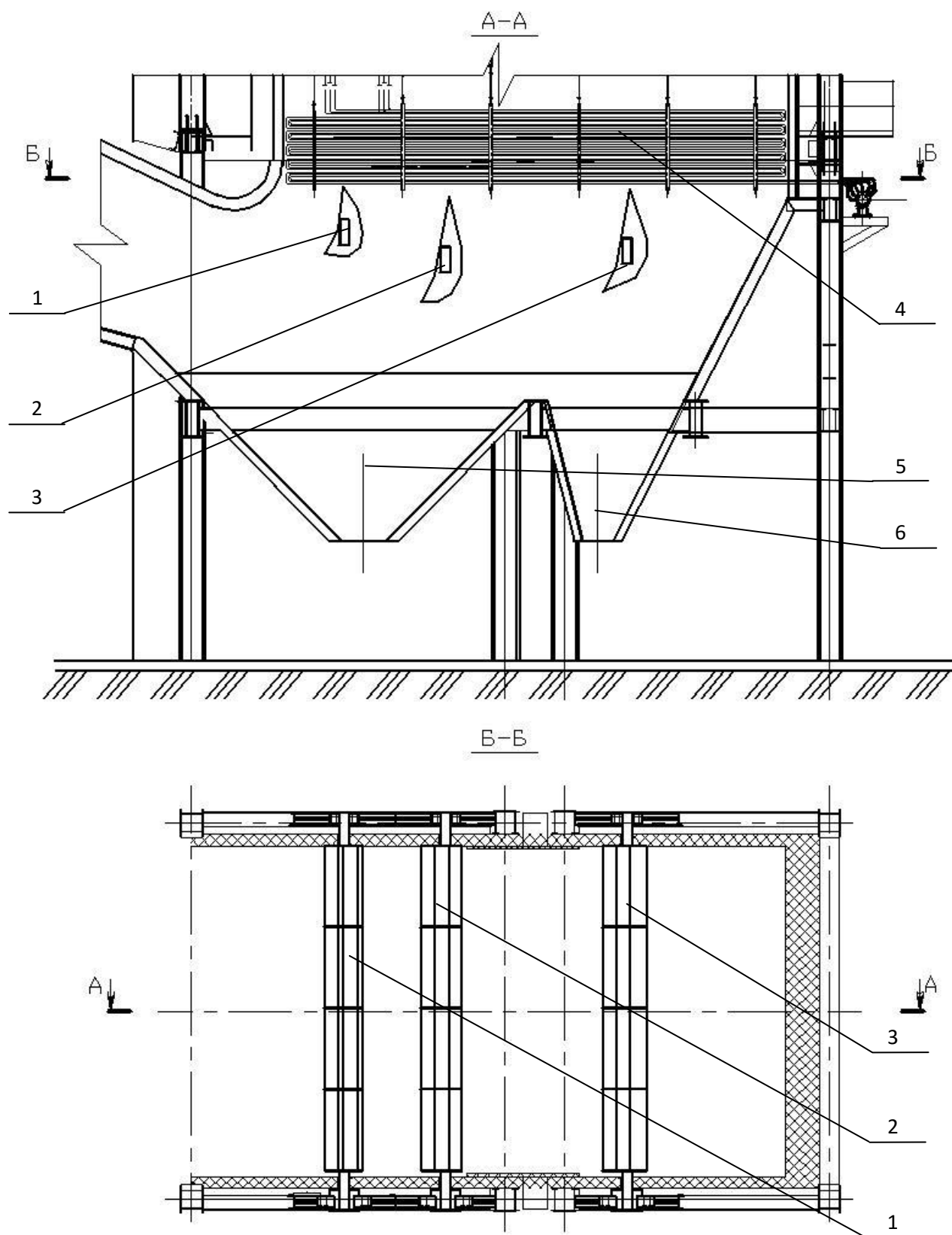
Прочность каждой вставки обеспечивается за счет пропущенной по центру вставки балки, так же выполненной из стали 20Х23Н13. Крепление обшивки крыла к балке и одновременно жесткость конструкции обеспечивается при помощи 4-х шпангоутов, установленных равномерно по длине балки. С торцов аэродинамическая вставка заглушена. С нижней стороны вставка и балка не замкнута, для предотвращения накопления пыли во внутреннем пространстве.

Система вставок опирается на собственный каркас, установленный на портале подъемного газохода.

Каждая балка имеет одну жесткую и одну «плавающую» опору для компенсации температурных расширений.

Бункера под подъемной конвективной шахтой представляют собой 8 отводов (по 4 на шахту). Количество отводов бункеров обусловлено соблюдением требуемых углов наклона для предотвращения накопления золы.

Общий вид системы выравнивания и бункеров приведен на рисунке 1.6.



1 – вставка выравнивающая левая; 2 – вставка выравнивающая средняя; 3 – вставка выравнивающая правая; 4 – экономайзер высокого давления; 5 – левый бункер; 6 – правый бункер

Рисунок 1.6 – Система выравнивания дымовых газов

1.6 Тркт сетевого подогревателя (экономайзера низкого давления)

Для снижения температуры уходящих газов на корпусе предусмотрена установка экономайзера низкого давления, включенного в тепловую схему блока.

Включение экономайзера низкого давления корпуса выполнено следующим образом:

С одной стороны организован замкнутый контур циркуляции воды по тракту ВЭК НД – водо-водяной теплообменник (ВВТО).

Циркуляция среды в замкнутом контуре обеспечивается при помощи двух циркуляционных насосов типа ТР-200-380/4. Циркуляция среды осуществляется при помощи одного насоса, второй находится в резерве. Подпитка замкнутого контура осуществляется от напорного коллектора бустерных насосов. На тракте замкнутого контура предусмотрено необходимое количество запорно-регулирующей и предохранительной арматуры.

1.7 Гидравлическая схема корпуса

Тркт высокого давления блока каждого корпуса разделен на две нитки – А и Б для корпуса А, В и Г – для корпуса Б. Нитки А, В включают в себя поверхности нагрева и перепускные трубы с правой стороны корпуса, нитки Б, Г – с левой.

Движение среды по тракту высокого давления следующие (для одной нитки): питательная вода по трубе Ø325×40 15ГС подаётся во входной коллектор ВЭК ВД. Защитные экраны стыка НРЧ – СРЧ запитаны байпасом ВЭК ВД трубой Ø76×10 12Х1МФ. Защитные экраны установлены последовательно по ходу движения среды следующим образом: фронтальной экран, боковой, задний.

От выходного коллектора ВЭК ВД по трубе Ø325×40 12Х1МФ вода подается во входные коллекторы ширм НРЧ. Из выходных коллекторов ширм НРЧ вода подается во входные коллекторы задней стены НРЧ трубой Ø325×40 12 Х1МФ. От выходных коллекторов задней стены НРЧ вода подается трубой Ø325×40 12Х1МФ во входные коллекторы фронтальной стены НРЧ. Из выходных коллекторов фронтальной стены НРЧ вода по трубе Ø325×40 12Х1МФ подается к коллекторам боковой стены НРЧ. Раздача на коллекторы боковой стены НРЧ от общей трубы Ø325×40 12Х1МФ выполняется трубами Ø108х12 12Х1МФ (по три трубы на коллектор). От выходного коллектора боковой стены НРЧ среда подается трубой Ø325×40 12Х1МФ во входной коллектор задней стены СРЧ. От выходного коллектора задней стены СРЧ среда подается трубой Ø325×45 12Х1МФ во входной коллектор фронтальной и потолочной стен ВРЧ. Из выходного коллектора панелей потолка над топкой среда подается по трубе Ø325×40 12Х1МФ во входной коллектор боковой стены СРЧ. После боковой стены СРЧ среда подается во входные коллекторы ШПП 1 по трубе Ø325×45 12Х1МФ. После ШПП 1 поток направляется в ППТО по трубе Ø325×40

12Х1МФ. После ППТО поток поочередно проходит следующие поверхности нагрева: подвесные трубы опускного газохода, боковой экран поворотной камеры, задний экран и потолок поворотной камеры, после чего направляется в коллектор впр. пароохладителя (впрыск 1). Затем поток через встроенную задвижку по трубе $\varnothing 325 \times 40$ направляется во входные коллектора ШПП 2. До и после встроенной задвижки в трубу врезаны отводы на растопочный сепаратор. После ШПП 2 перепускными трубами $\varnothing 325 \times 60$ 12Х1МФ поток направляется во входные коллектора ШПП 3. После ШПП 3 поток поступает в коллектор впр. пароохладителя (впрыск 2). После пароохладителя поток последовательно проходит ШПП 4, ШПП 5 и направляется в ЦВД. После ШПП 5 предусмотрена подача впрыска при растопке.

Тракт промперегрева каждого корпуса разделен на четыре нитки. Две нитки включают в себя поверхности нагрева и перепускные трубы с правой стороны котла, остальные две нитки – с левой. Перебросов по сторонам котла и промежуточных смешиваний потоков нет.

Пар от ЦВД к корпусу подается одной общей трубой $\varnothing 630 \times 16$ Сталь 20, перед корпусом от трубы выполнено разделение на потоки трубами $\varnothing 426 \times 16$ Сталь 20. После ЦВД пар подается в ШВП 1, из выходных коллекторов пар направляется трубой $\varnothing 426 \times 17$ в ППТО, откуда поступает во входные коллектора ШВП 2 и далее в ШВП 3. Предусмотрен регулируемый байпас ППТО по вторичному тракту. После ШВП 3 пар направляется в ЦСД турбины двумя потоками. Перед ШВП 3 предусмотрен аварийный впрыск воды от промступени насосов.

1.8 Тягодутьевое оборудование

Каждый корпус котла оборудован следующим тягодутьевым оборудованием:

Подача воздуха выполняется при помощи двух дутьевых вентиляторов типа ВДН-28 на корпусе А и при помощи двух вентиляторов типа ВДН-25×2 на корпусе Б. Регулирование производительности дутьевых вентиляторов осуществляется при помощи направляющих аппаратов и изменением частоты вращения электродвигателя. Забор холодного воздуха выполнен с улицы или из помещения цеха.

Удаление дымовых газов каждого корпуса выполняется при помощи двух дымососов типа ДО-31,5. Регулирование производительности дымососа осуществляется направляющим аппаратом.

Рециркуляция дымовых газов осуществляется при помощи дымососа рециркуляции типа ДН-21МК. На каждом корпусе установлено два дымососа рециркуляции.

Характеристики тягодутьевого оборудования корпуса приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Характеристики тягодутьевого оборудования

| №№п/п | Наименование | Величина |
|-------|---|---|
| 1А. | Дутьевой вентилятор | ВДН-28 |
| 1.2. | Производительность | 482000 м ³ /час |
| 1.3. | Напор | 512 кг/м ² |
| 1.4. | Число оборотов | 744/595 об/мин |
| 1.5. | Допустимая температура воздуха на входе в вентилятор | 70°С |
| 1Б. | Дутьевой вентилятор | ВДН-25хII |
| 1.2. | Производительность | 450×10 ³ ÷ 500×10 ³ м ³ /час |
| 1.3. | Напор | 812 кг/м ² |
| 1.4. | Число оборотов | 750/1000 об/мин |
| 1.5. | Допустимая температура воздуха на входе в вентилятор | 70°С |
| 2. | Дымосос | ДО-31,5 |
| 2.1. | Производительность | 767000 м ³ /час |
| 2.2. | Напор | 347 мм в.ст. |
| 2.3. | Потребляемая мощность | 920 кВт |
| 2.4. | Допустимая температура газов | 200°С |
| 2.5. | Скорость вращения | 496 об/мин |
| 2.6. | КПД (при угле поворота направляющего аппарата на 10°) | 85,5% |
| 2.7. | Мощность электродвигателя | 1700 кВт |
| 2.8. | Напряжение | 6000В |
| 2.9. | Ток электродвигателя | 216А |
| 3. | Дымосос рециркуляции дымовых газов | ДН-21МК |
| 3.1. | Производительность | 81,4 ×10 ³ м ³ /час |

Продолжение таблицы 1.2

| | | |
|------|---|------------|
| 3.2. | Напор | 510 |
| 3.3. | Допустимая температура газов | 250 °С |
| 3.4. | Скорость вращения | 985 об/мин |
| 3.5. | КПД (при угле поворота направляющего аппарата на 10°) | 85% |

1.9 Предварительный подогрев воздуха

Подогрев воздуха осуществляется рециркуляцией части горячего воздуха на всас дутьевых вентиляторов, забором воздуха из помещения и при помощи калориферов.

1.10 Очистка дымовых газов

Для очистки дымовых газов предусмотрены электрофильтры типа ЭГА-1-38-7,5-4-3, расположенные в два яруса. Каждая конвективная шахта имеет собственный блок электрофильтров. При техническом перевооружении конструкция электрофильтров не изменялась. Техническая характеристика электрофильтра приведена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 - Технические характеристики электрофильтра ЭГА-1-38-7,5-4-3

| | Завод изготовитель | Семибратовский завод металлоконструкций. | |
|----|-----------------------------------|--|-------------------|
| 1. | Габариты эл. фильтра в плане | мм | 15525×14100×13630 |
| 2. | Скорость газов в активном сечении | м/сек | 2,5 |
| 3. | Запыленность газов на входе | г/м³ | 40 |
| 4. | Температура газов на входе | °С | 200 |
| 5. | Разрежение в эл. фильтре | мм. вод ст. | 200 |
| 6. | Количество полей | шт. | 3 |
| 7. | КПД | % | 98÷99 |

1.11 Центральный пылезавод

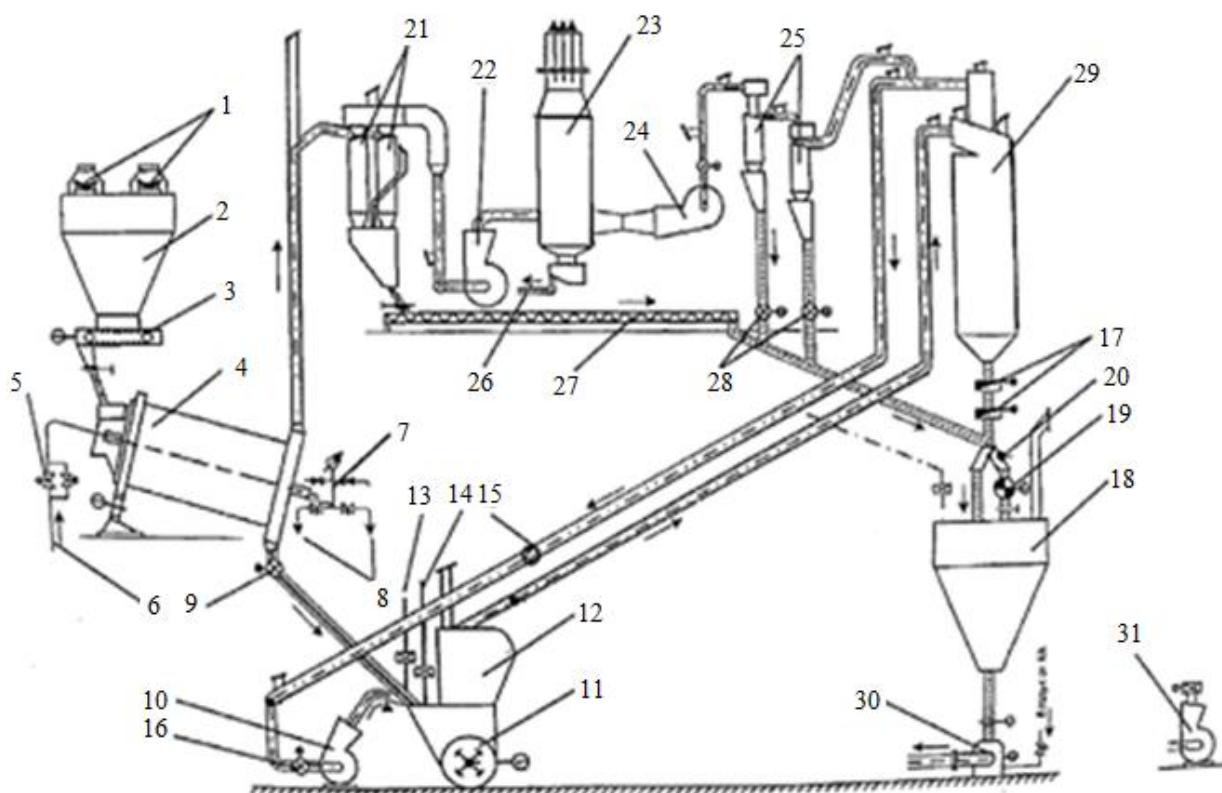
Подготовка топлива осуществляется на центральном пылезаводе, который состоит из 5 независимых друг от друга ниток пылеприготовления: по 2 нитки на корпус и одна резервная на оба корпуса. Схема ЦПЗ представлена на рисунке 1.12.

На каждой нитке сырой уголь из бункера сырого угля подается ленточным транспортером производительностью 100 т/ч в трубчатую сушилку, где подсушивается с 40 до 14 % влажности. После трубчатой сушилки уголь измельчается в молотковой мельнице типа ММТ-2600/3350/590, оборудованной инерционным сепаратором. Расчетная тонина помола по полному остатку на сите 90 мкм составляет $R_{90}=60\%$. Вентиляция мельницы осуществляется смесью воздуха и инертных газов, циркулирующей по замкнутому циклу.

После мельницы пылевоздушная смесь поступает в циклон пыли типа ЦП-2, где транспортный агент отделяется и направляется мельничным вентилятором обратно в мельницу, пыль направляется в промежуточный бункер пыли. Транспорт пыли до бункеров в котельном цехе осуществляется сжатым воздухом при помощи пневмовинтовых насосов типа ПВН-300 (по 1 на нитку). Подача воздуха к пневмовинтовым насосам осуществляется компрессором с расчетной производительностью 10000 м³/ час и давлением 4,5 ати. Один компрессор обеспечивает воздухом 5 ниток топливоподачи. Предусмотрена установка резервного агрегата.

Удаление транспортного агента из бункеров пыли котла осуществляется при помощи 4 (по 1 на бункер пыли) вентиляторов типа ВВД-9 с предпочисткой транспортного агента в циклонах. Сброс транспортного агента осуществляется в топку, предусмотрена возможность сброса агента в атмосферу.

Подача пыли из бункера котла осуществляется лопастными питателями УППЛ-2. Транспорт пыли к горелкам осуществляется системой подачи пыли с высокой концентрацией (ПВК) по трубам Ø82 мм. Сжатый воздух на систему ПВК поступает от воздухоудвки ТВ-175-1,6.



1 –

ленточные питатели ЛК-6; 2, 3 –бункер и питатель сырого угля; 4 – паровая трубчатая сушилка; 5,6 – запорная задвижка и подвод пара к сушилке от РОУ; 7, 8 – отвод и слив конденсата; 9 – шлюзовый питатель; 10 – мельничный вентилятор; 11 – мельница ММТ-2800/3360; 12 – инерционный сепаратор; 13,14 – клапаны присадки холодного воздуха и дымовых газов; 15 – датчик расхода воздуха МВ; 16 – регулирующий шибер; 17 – мигалки; 18 – бункер пыли; 19 – ПШР; 20 – влагомер; 21 – циклон Ц-750; 22,24 – вентиляторы; 23 – МП тип ВТО; 25 – блочная циклонная установка; 26 – слив в ГЗУ; 27 – питатель шнековый; 28 – шлюзовый запорный механизм; 29 – циклон пыли; 30 – пневмовинтовой насос; 31 – компрессор

Рисунок 1.12 – Схема центрального пылезавода

Расчетное топливо – сушенка Назаровского бурого угля. Характеристики расчетного топлива приведены в таблице 1.4 и на рисунке 1.12.

Таблица 1.4 – Теплотехнические характеристики расчетного топлива

| Наименование | Обозначение | Размерность | Значение |
|---|-------------|-------------|----------|
| Элементарный состав топлива на рабочую массу: | | | |
| Влага | W_t^r | % | 39,0 |
| Зола | A^r | % | 7,3 |

Продолжение таблицы 1.4

| | | | |
|---|---------|---------|-------|
| Сера | S^r | % | 0,59 |
| Углерод | C^r | % | 37,55 |
| Водород | H^r | % | 2,63 |
| Азот | N^r | % | 0,43 |
| Кислород | O^r | % | 12,38 |
| ВСЕГО | | % | 100,0 |
| Низшая теплота сгорания | Q_n^p | ккал/кг | 3240 |
| Выход летучих на сухое беззольное состояние | V^z | % | 47 |

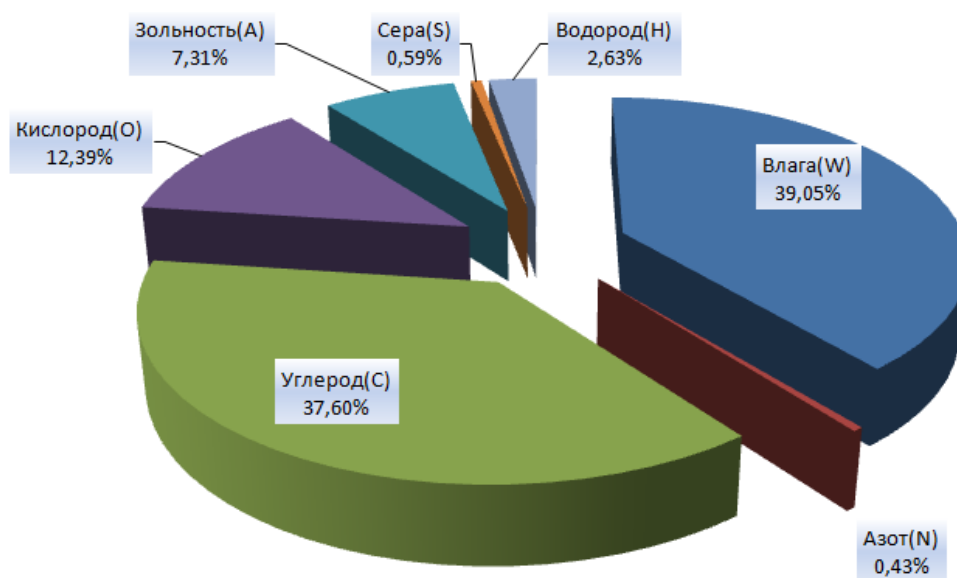


Рисунок 1.13 – Химический состав Назаровского угля

2 Недостатки в процессе эксплуатации котельного агрегата П-49, после технического перевооружения

В процессе эксплуатации был выявлен ряд недостатков в работе оборудования, связанных с конструкцией котла, со спецификой минеральной части топлива:

1.Повышение температуры газов на выходе из топки, составляющие 1320 °С, что почти на 100 С выше расчетной температуры газов на выходе из топочной камеры и на 200 выше допустимой по условиям шлакования для сильношлакующих назаровских углей, равной 1100 °С;

2.Низкая эффективность средств очистки поверхностей нагрева как радиационных, так и конвективных;

3.Шлакование и занос поверхностей нагрева вследствие высоких температур газов на выходе из топки и по газоходам котла;

4.Низкая надежность работы пароперегревательных поверхностей нагрева;

5.Низкая экономичность работы котла (КПД брутто- 89,2%, вместо проектного- 92,7 %), при этом основная потеря- потеря тепла с уходящими газами (10,25% вместо проектной 6,16%), вследствие высоких температур уходящих газов (200° С вместо 165 °С по расчету);

6.Полное забитие шлаком и золой бункеров под перепускными газоходами.

2.1 Анализ причин повреждения котельных агрегатов в процессе эксплуатации

Основным требованием, предъявляемым к энергетическим установкам, является обеспечение надежной и экономичной работы стационарного оборудования. Однако эксплуатация энергетического оборудования сопровождается многочисленными аварийными ситуациями, что приводит к незапланированным (аварийным) остановам.

Как показывает опыт эксплуатации и ремонта энергооборудования около 30-40% отказов энергоблоков приходится на долю котлов и котельно-вспомогательного оборудования. В свою очередь главной причиной отказов котлов являются повреждения поверхностей нагрева, из-за которых происходит примерно 50% внеплановых остановов. Удельное число отказов на котел составляет 4-4,5 раза в год [1]. Как показывает статистика повреждений (рисунок 2.1) около 50 % повреждений приходится на долю полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева. Из них 70 % приходится на долю ширмовых пароперегревателей.

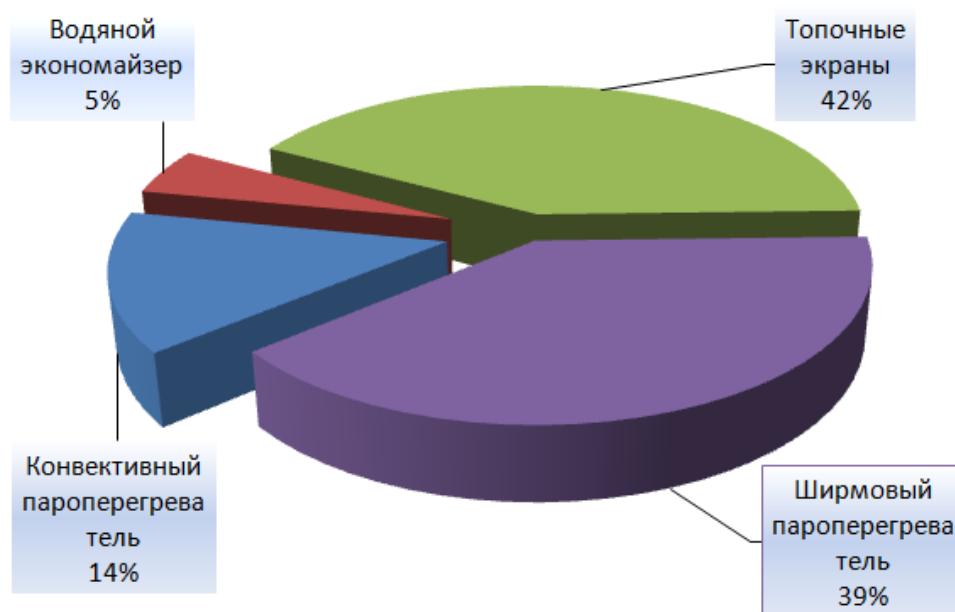


Рисунок 2.1 – Статистика повреждений поверхностей нагрева пылеугольного котла

Данная статистика характерна для всех видов котельных агрегатов, сжигающих твердое топливо. Для котельных агрегатов, сжигающих жидкое и газообразное топливо, наиболее повреждаемой поверхностью является первичный пароперегреватель.

Одной из главных причин отказов котлов, сжигающих твердое топливо, является интенсивное шлакование и загрязнение поверхностей нагрева =39 %, либо вызванный шлакованием перегрев металла труб (рисунок 2.2).

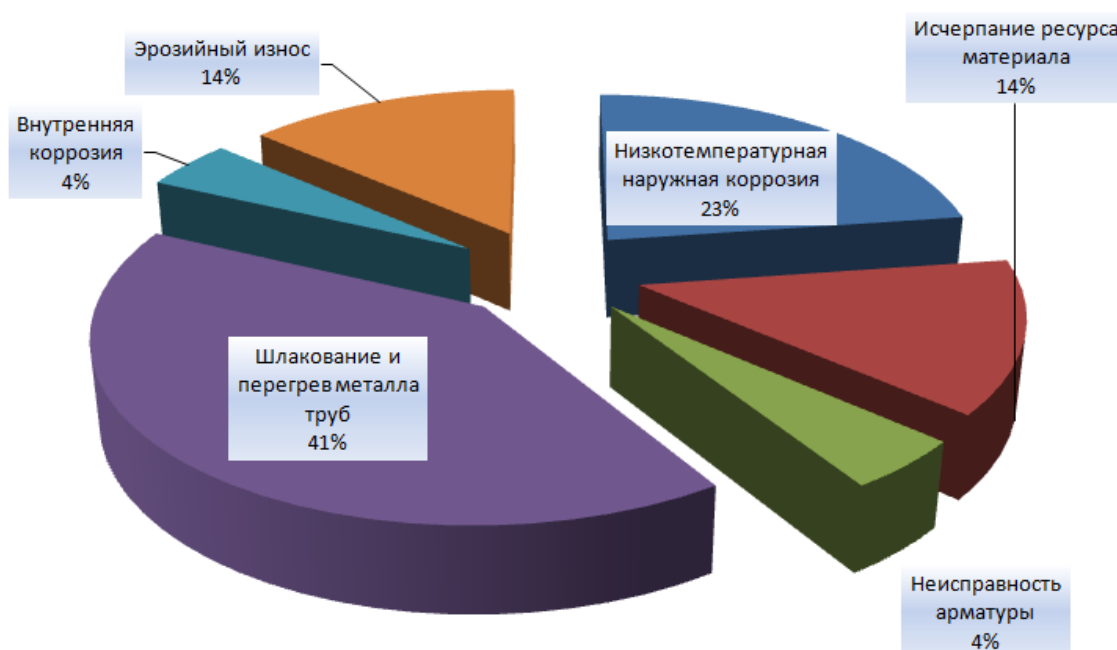


Рисунок 2.2 – Статистика причин повреждений поверхностей нагрева

Причиной большого числа повреждений поверхностей нагрева, по вине шлакования является отсутствие информации у эксплуатационного персонала о степени шлакования или загрязнения каждой из поверхностей нагрева на текущий момент. В настоящее время эксплуатационный персонал судит об интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева только по косвенным показателям, анализируя показания штатного контроля.

Видно, что наиболее повреждаемыми элементами пылеугольных котлов, являются полурadiaционные и конвективные поверхности нагрева.

2.2 Влияние шлакования и загрязнения поверхностей нагрева на надежность работы котельных агрегатов

Эффективность и надежность работы современных энергетических котлов, работающих на твердом топливе, во многом определяется интенсивностью протекания процессов шлакования различных поверхностей нагрева. Среди традиционных причин аварийной работы котлов по условиям шлакования и загрязнения является нестабильный топливный баланс электростанций, освоение новых углей и технологий их переработки, отсутствие или неполнота сведений для ряда используемых топлив. Интенсивное загрязнение поверхностей нагрева оказывает влияние на снижение коэффициента полезного действия котельного агрегата и его установленной мощности, уменьшение срока межремонтного периода и увеличение затрат на расшлаковку поверхностей нагрева. В настоящее время определение пути решения указанной проблемы возможно лишь при рассмотрении всех взаимосвязей факторов, определяющих процесс образования и роста золовых отложений на основе их системного анализа по положениям различных теорий и гипотез.

Базовой работой, положившей начало большому циклу различных исследований в этом направлении, является монография [3], в которой сделана качественная оценка процесса массопереноса твердой фазы в газе под воздействием различных сил, и показано, что интенсивность загрязнения подчиняется экспоненциальному закону согласно уравнению $m = m_0 \cdot e^{-kr}$, где m_0 - поток загрязнений, падающий на чистую поверхность нагрева в момент времени $\tau = 0$; k - коэффициент пропорциональности, зависящий от величины теплового радиационного потока q_p , проходящего через слой отложений, коэффициента теплопроводности λ_z и удельного веса γ_z загрязнений. Установленная зависимость сформулирована на основе системы уравнений, описывающих молекулярный перенос для процессов теплопроводности, вязкости и диффузии в газах и жидкостях (уравнения Фурье, Ньютона, Фика в одномерной постановке). Впервые была предпринята попытка дать математическое описание сил термофореза F_m , светового давления F_c , электростатического F_m и межмолекулярного F_m притяжения, гравитационных F_g , и турбулентных пульсаций F_n . Особую ценность в работе имеют

аналитические зависимости изменения коэффициентов теплопроводности отложений от химико-минералогического состава топлива, температурой сжигания в топке, темпа нагрева и аэродинамики пылеугольного факела, состава топочной среды, тонины помола и температуры поверхности труб.

Влияние направления и скорости газового потока, фракционного состава золовых частиц на коэффициент загрязнения сыпучих отложений конвективных поверхностей в зависимости от конструктивных характеристик их исполнения (диаметра труб, шага между трубами, типа трубного пучка и места его расположения) рассмотрены в [4]. Выявлены закономерности, изложенные в виде численных соотношений и номограмм. Универсальной характеристикой образования отложений, на взгляд авторов, является температура стенки, при достижении которой возникают плотные загрязнения золой и шлаком на лобовой поверхности труб, определяемой по эмпирической формуле: $t_{\text{возн}} = 554 - 5,8 \cdot \omega_g + 1,7 \cdot d_n$, °C, где ω_g – скорость газов; d_n – наружный диаметр труб. Отмечается, что формула вполне работоспособна для диапазонов: температуры газов $t_g = 600 - 1200^\circ\text{C}$; $\omega_g = 5 - 20 \text{ м/сек}$; $d_n = 32 - 57 \text{ мм}$. При этом повышение температуры газов на 100°C приводит к росту $t_{\text{возн}}$ приблизительно на 30°C . Из предложенного соотношения видно, что с ростом скорости газа и уменьшением диаметра труб создаются более благоприятные условия для оседания мелких фракций золы, которые значительно активней в отношении процессов связывания.

Значительное развитие вопросов, связанных с изучением натрубных отложений получено в [5]. Исследованы процессы формирования различных слоев отложений, их физико-химические характеристики, фазовые превращения минеральных составляющих при упрочнении золовых отложений, процессы кристаллизации, спекания и сульфатизации кальциевых соединений в среде дымовых газов. Согласно изложенной гипотезе процесс образования отложений можно разделить на три стадии: перенос массы через пограничный слой, сцепление частиц с поверхностью нагрева и увеличение толщины слоя. Первичный слой образуется за счет щелочно-силикатных соединений, частицы которых по условиям гравитационно-термофорезно-аэродинамической сепарации первыми десублимируются на чистой поверхности нагрева. Формирование промежуточного слоя во многом определяется селективным отложением легкоплавких эвтектик. Причиной неравномерного распределения по слою легкоплавких элементов являются следующие факторы: а) более высокий удельный вес или более высокая теплопроводность окислов этих элементов по сравнению с этими же показателями у окислов $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{R}_2\text{O}$; б) неравномерность распределения температуры по толщине слоя отложений. Наружный, вторичный слой отложений начинает образовываться после достижения внутренним слоем размеров, достаточных для термоизоляции трубы. Обеспечение на внешней поверхности промежуточного слоя такой температуры, при которой оседающие частицы летучей золы могут оставаться в

липком состоянии, и служит определяющим фактором для инициализации дальнейшего роста отложений, называемых вторичными.

Обобщением результатов всех вышеперечисленных исследований является работа [6], в которой экспериментально на примере сжигания канско-ачинских углей доказано влияние особенностей состава минеральной части топлива, конструктивных характеристик элементов котельного агрегата, аэродинамики факела и температуры газов в его ядре на процесс шлакования. Достаточно широко представлены данные по высокотемпературному сжиганию топлив разного качества в топках с жидким шлакоудалением. Показано, что при таких условиях переработки угля происходит деструкция и выгорание серы, которая в свою очередь приводит к образованию в основном рыхлых натрубных отложений, легко поддающихся удалению в процессе паровой или водяной обдувки загрязненных поверхностей нагрева. Условия для протекания процесса сульфатизации становятся неблагоприятными для взаимодействия сернистого ангидрида и золы. Если ранее склонность летучей золы к сульфатизации оценивали по приросту в весе или по увеличению в пробах, прокаливающихся в лабораторных печах, а также по сопротивлению при сжатии образцов спрессованной летучей золы после прокаливания их в среде SO_2 , то в данном подходе доказано, что наиболее объективной величиной степени сульфатизации следует считать параметр $K_{so_3} = [SO_3]_o / (1,428CaO + 1,986MgO + 0,85K_2O + 1,291Na_2O)$, представляющей отношение действительного содержания SO_3 в пробах к теоретически возможному, которое рассчитывается по содержанию активных по отношению к SO_2 окислов, предполагая, что они полностью могут сульфатизироваться.

Аналогичные исследования с некоторыми иными акцентами изложены в [7]. Выполнен глубокий анализ характеристик минеральной части широкого класса твердых топлив, изучено изменение химического состава шлака и золы в зависимости от тонины помола угля и условий его сжигания, исследован процесс теплообмена летящей частицы золы в момент контакта с рабочей поверхностью, а также влияние на этот процесс скорости газового потока. Установлено, что частицы летучей золы, движущиеся с потоком газов, охлаждаются за счет излучения ниже температуры газовой среды. Чем мельче частицы золы, тем больше степень их охлаждения и наоборот. Интенсивность же шлакования обратно пропорциональна величине разности температур поверхности золовой частицы и температур поверхности металла трубного пучка. Развитие вопроса определения условий образования вторичных (гребневидных) отложений в данной работе достигнуто путем обоснования выражения критической условной температуры на наружной поверхности загрязнений, при которой начинается их рост:

$$t_{кy} = t_c - \frac{1}{\alpha_1} \cdot \left(\frac{Q}{H} \right) \quad (2.1)$$

где t_2 – температура газов; Q/H – удельное тепловосприятие поверхностей нагрева; α_1 – коэффициент теплоотдачи от газов к наружной поверхности.

Широкий цикл исследований минеральной части топлива и ее плавкостных характеристик представлен в [8]. Изучено изменение химических и физических свойств органоминеральной части угля на стадии его подготовки в системе пылеприготовления, влияние траектории движения частиц золы в топочной камере и межтрубном пространстве, а также различных режимных параметров на ее теплофизические свойства, рассмотрен вопрос поведения серы и ее соединений на интенсивность образования золовых отложений. Впервые обоснован критерий прогноза оценки процесса шлакования, получивший в дальнейшем название силикатного модуля, характеризующего зависимость изменения содержания основных окислов от температуры начала размягчения золовой частицы. За параметр, характеризующий качество минеральной части исходного топлива, условно принята характеристика плавкости (степени кислотности) золы $K = (SiO_2 + Al_2O_3) / (CaO + MgO + FeO + Fe_2O_3)$, представляющая отношение количества окислов, увеличивающих температуру плавления шлаков, к окислам, способствующим ее уменьшению. Результаты исследований закономерности влияния химического состава золы сжигаемого угля на загрязняющий индекс, совпадают с данными описываемыми следующим эмпирическим уравнением [9]:

$$F.ind = 0,03SiO_2 + 0,092Fe_2O_3 + 0,06CaO + 0,264MgO + 0,423Na_2O - 0,0106 \quad (2.2)$$

Члены правой части уравнения представляют собой содержание соответствующих окислов в отложениях (в % на сухую массу).

Принципиально новый подход в трактовке проблемы шлакования предложен в работе [10]. Результаты исследований обобщены в виде математической модели, учитывающей динамику движения и физико-химические свойства золовой частицы. Определена форма аналитического описания сил адгезии, деформации и отражения жидких или размягченных шлаковых частиц при ударе о поверхность трубы. Критериальное уравнение, характеризующее процесс образования золошлаковых отложений в общем виде записывается в форме следующего функционала:

$$K_{шл} = f\left(\frac{\rho_{жс} \omega^2}{E_{жс}}; \frac{\sigma_{жс}(1 + \cos \theta)}{\rho_{жс} \omega^2 \delta_{жс}}; \frac{\eta}{\rho_{жс} \omega \delta_{жс}}; \frac{E_m}{\delta_m^2 \rho_m \omega^2}; \frac{\beta'}{\beta''}\right), \quad (2.3)$$

где $\rho_{жс} \omega^2 / E_{жс}$ - отношение сил инерции к упругим силам (критерий Коши); $\sigma_{жс}(1 + \cos \theta) / \rho_{жс} \omega^2 \delta_{жс}$ - отношение удельной энергии сил адгезии частиц золы к их кинетической энергии; $\eta / \rho_{жс} \omega \delta_{жс}$ - критерий Вебера; β' / β'' - коэффициент эффективности столкновения (коэффициент реализации); $E_m / \delta_m^2 \rho_m \omega^2$ -

коэффициент изменения скорости отскочившей частицы. Численные результаты моделирования подтверждены данными экспериментальных исследований процесса наброса частиц канифоли и лимонной кислоты на холодную поверхность.

Сравнительный анализ поведения продуктов сгорания эстонских сланцев и канско-ачинских углей показал существенное влияние содержания окиси кальция на динамику и характер золовых отложений [11, 12]. В этих работах в наиболее полном объеме представлены результаты исследований минеральной части углей, изменения физико-химических составляющих различных фракций угольной пыли после размола, увязана кинетика горения пылевидного топлива и превращение неорганической его части в топке котла, изучены механизм образования сульфатносвязанных золовых отложений, динамика загрязнения радиационных поверхностей нагрева и влияние этого процесса с учетом неизотермичности факела на теплообмен. При лучистом теплообмене коэффициент тепловой эффективности Ψ , тепловое сопротивление слоя отложений R и поглощательная способность его поверхности α связаны между собой через уравнение теплового баланса:

$$R = \left(\sqrt[4]{\frac{\alpha - \Psi}{\varepsilon \sigma_o}} q_n - T_n \right) (\Psi q_n)^{-1}, \quad (2.4)$$

где ε - степень черноты отложений; σ_o - постоянная Стефана-Больцмана; T_n - абсолютная температура поверхности металла. В процессе загрязнения топочных поверхностей нагрева тепловое сопротивление золошлаковых отложений со временем изменяется вследствие увеличения толщины и химических превращений слоя. Применительно к неизотермическим условиям выгорания пылеугольного факела динамика изменения теплового сопротивления приближенно выражается формулой:

$$R_p = A \tau^{0.7}, \quad (2.5)$$

где A - коэффициент зависящий от типа топочного устройства и теплонапряжения поперечного сечения топки, R - тепловое сопротивление золовых загрязнений. Отмечено, что конструкция элементов котлоагрегата должна соответствовать таким условиям выгорания, при которых осуществляется равномерное распределение окислителя как по высоте, так и по сечениям топки для исключения зон с восстановительной или полувосстановительной средой. Накопленный большой экспериментальный материал позволил перейти к разработке расчетных подходов и способов оценки шлакования поверхностей нагрева парового котла [13, 14]. Обосновано использование понятия температуры фактического начала шлакования, являющейся функцией химического состава золы, который в свою очередь изменяется по ходу движения частицы в факеле в зависимости от режима и условий сжигания угля. Выполнены исследования окислительно-восстановительных соотношений и измене-

ния доли железистых соединений в стекловидной фазе летучей золы в зависимости от состава минеральной части, избытка воздуха и технологических схем сжигания топлива. Предложен оригинальный метод регламентации значений температур газов на выходе из топki по сведениям о прочности отложений при спекании, определяемым с помощью уравнений аппроксимации на основе данных о составе золы. Рекомендуемая температура газов ϑ''_T должна быть меньше величины $kt_{\text{ул}}$. В свою очередь температура начала шлакования $t_{\text{ул}}$ оценивается по среднему химическому составу минеральной части угля по формуле: $t_{\text{ул}} = 945 + 8,22K / O$ или летучей золы $t_{\text{ул}} = 895 + 16,11 \frac{K + Fe_k}{O + Fe_o}$. В

последнем соотношении используются сведения о форме железа в стекловидной фазе $Fe_k = Fe^{3+} Fe_2O_3 / 100\%$ и $Fe_o = Fe^{2+} Fe_2O_3 / 100\%$. Выявлено суммарное воздействие пирита в тяжелых фракциях, сульфидной серы, окиси кальция и щелочных металлов на величину степени шлакования. Показано, что вероятность разевания железистых отложений повышается при сжигании углей с наличием в его минеральной части сидерита или сульфатно-кальциевых соединений. Для прогнозирования шлакующих и загрязняющих свойств углей предложен способ их ранжирования по ряду различных признаков, эмпирических показателей и индексов. В частности склонность к образованию железистых отложений определяется потенциалом $P_n = 3,96 - 2,47 / Fe_2O_3$, характеризующим долю пиритного железа в пересчете на Fe_2O_3 от общего содержания железа для тяжелой фракции угольной пыли. Индекс прогнозирования сульфатно-кальциевых отложений определяется по выражению $P_{Ca} = CaO \sqrt{K_2O} / Na_2O$. Уголь, склонный к образованию таких отложений, имеет $P_{Ca} > 10$. Склонность углей к образованию загрязнений на базе активных щелочей определяется с помощью линеаризованного показателя зависимости активного и общего натрия $P_{Na} = 0,69(1,17Na_2O - 0,18K_2O - 0,49)^{0,313} - 0,333$, учитывающей соотношение их в водорастворимой форме и аллюмосиликатах.

Использование возможностей современных ЭВМ в сочетании с математическим моделированием преобразования минеральных примесей при факельном сжигании угля [14] позволило разработать методику расчета зоны активного горения топочного устройства с учетом нейтрализации негативного поведения неорганической части и сформулировать основные требования к организации процессов подготовки и сжигания топлива. Минимальное необходимое время температурной обработки предлагается определить по выражению:

$$\tau_{mo} = k_{\tau} Q_{\text{н}}^p 273 / q_v V_{\varepsilon} T_{cp}, \quad (2.6)$$

где k_τ - относительный показатель температурной обработки, являющийся функцией размера пылеугольных частиц с учетом перераспределения органоминеральной части топлива по фракциям. Между показателем $k_\tau = f(\delta)$ и теплонапряжением топочного объема q_v имеется пропорциональная связь, обусловленная сокращением времени пребывания угольных частиц в топке при увеличении q_v . При этом выявлена связь величины от коэффициента избытка воздуха и средней температуры топочной среды T_{cp} .

В работе [15] впервые была предпринята попытка связать динамику горения пылевидного топлива с процессами превращения минеральной части путем оценки и учета кинетических констант реакций разложения отдельных минералов и их взаимодействия в ходе топочного процесса. Получаемые данные затем используются в многовариантных расчетах процесса шлакования по математической модели с целью оценки значимости факторов, определяющих протекание изучаемого явления.

В наиболее полной мере накопленный опыт исследований по данному вопросу учтен в методике проектирования топочных устройств с твердым и жидким шлакоудалением [16]. В целях уменьшения шлакования трубных поверхностей температурный режим в зоне активного горения должен обеспечивать устойчивое выгорание угля на пониженных нагрузках при условии достижения нормативного значения тепловых напряжений топочного сечения и объема путем оптимального сочетания конструктивных характеристик топочной камеры, типа, количества и расположения горелочных устройств, режимных факторов и технических характеристик топлива.

Все вышеперечисленные факторы, определяющие процесс образования натрубных отложений, обобщены и представлены на рисунке 2.3. Наиболее рациональным способом отображения структуры взаимосвязей является их представление по принципу последовательности технологической переработки топлива. Из схемы вытекает, что механизм загрязнения поверхностей нагрева определяется совокупностью режимных и конструктивных характеристик, определяющих процессы: подготовки топлива к сжиганию; горения пылеугольного факела с учетом его аэродинамики; образования первичного слоя отложений и его упрочнения; формирования промежуточного слоя и вторичных, рыхлых отложений, с учетом качества органоминеральной части исходного топлива. Несмотря на сложность и разный характер протекания процессов, а также связей факторов, естественным свойством изучения данного вопроса служит потенциальная возможность контроля и прогноза поведения золошлаковых отложений. Именно интенсивность роста отложений, выраженная в динамике изменения коэффициента тепловой эффективности трубного пучка [17], либо толщины и коэффициента теплопроводности шлакового покрытия [18] является адекватным показателем надежности эксплуатации поверхностей нагрева. При этом оперативный мониторинг показателей загрязнения поверхностей нагрева невозможен только на основе использования штатных показателей работы котельного агрегата, так как необходимая информация

поступает в неявном виде, в форме сведений об изменении параметров рабочей среды и газов [19-21]. Зачастую расчет косвенных показателей или аналогий с помощью математической модели является достаточно эффективным средством.

Однако, несмотря на богатейший опыт исследований процесса шлакования в силу ряда причин до сих пор отсутствует эффективная методика оценки загрязнения, позволяющая выполнять оперативные вычисления для работающего оборудования и принятия соответствующих решений, направленных на уменьшение негативных последствий.

В значительной степени такая задача может быть решена путем оценки значимости всех факторов на основе их связей в структурной технологической схеме в предположении их аддитивного влияния с учетом характеристик сжигаемого топлива и особенностей протекания топочного процесса.

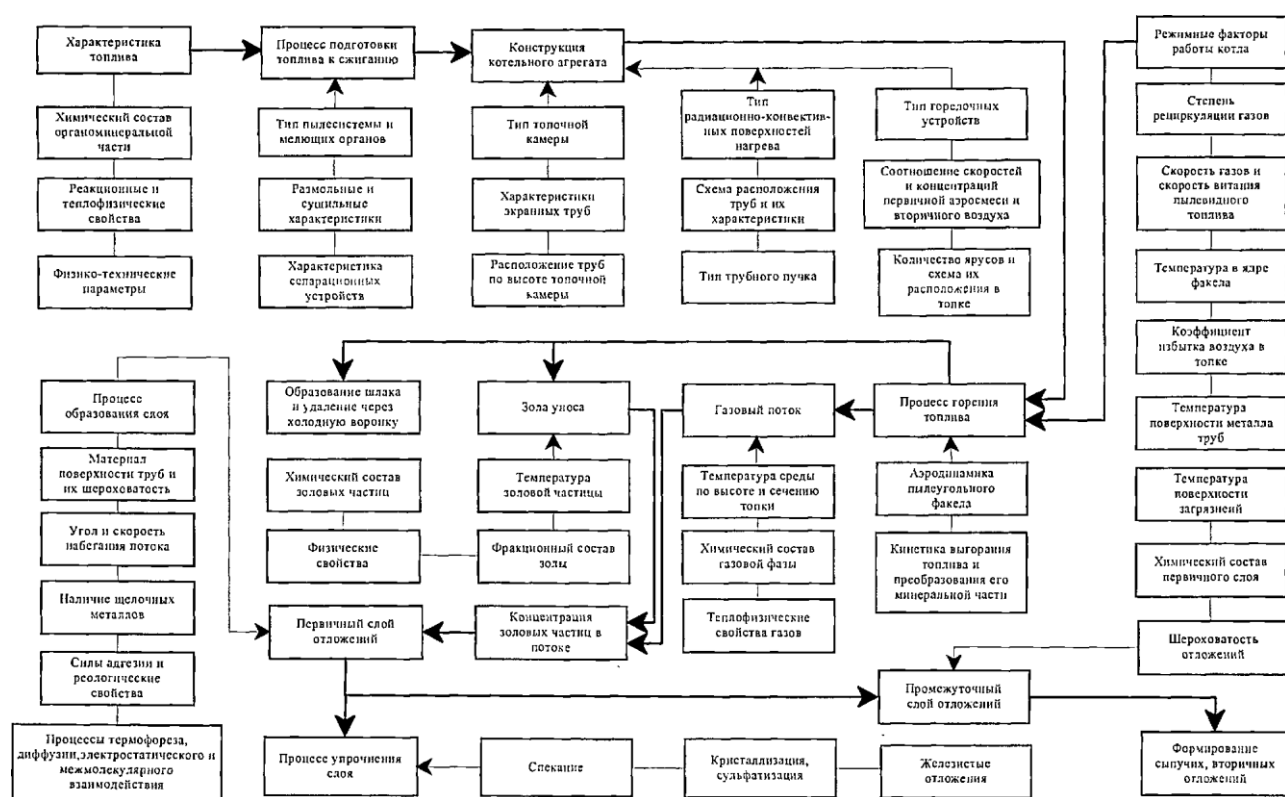


Рисунок 2.3 - Структурная схема технологических связей факторов, определяющих процесс шлакования поверхностей нагрева котельных агрегатов

В итоге, в процессе эксплуатации паровых котлов, интенсивное шлакование и загрязнение поверхностей нагрева приводит к значительным снижениям технико-экономических показателей и увеличению штрафных выплат, по причинам, связанным с увеличением количества выбросов в окружающую среду и аварийными остановами.

Последствия, оказывающие влияние на работу паровых котлов по причине шлакования и загрязнения, зависят не только от рассматриваемых процессов, но и от типа поверхности нагрева, на которые оказываются данные

воздействия. Например, интенсивное шлакование топочных экранов приводит к таким последствиям, как падение глыб шлака в холодную воронку с завалом и разрушением шлаковых комодов, нарушению аэродинамики горелочных струй и выгорания угольной пыли из-за затягивания горелочных устройств шлаком, повышению температуры газов на выходе из топки в связи со снижением тепловой эффективности экранов, приводящему к усилению шлакования ширмового пароперегревателя. В свою очередь, шлакование и загрязнение ширмовых и конвективных поверхностей нагрева характеризуется такими негативными последствиями, как повышение температуры уходящих газов, повышение уровня температуры в пароперегревателях, приводящее к превышению допустимой температуры металла змеевиков (рисунок 2.4).

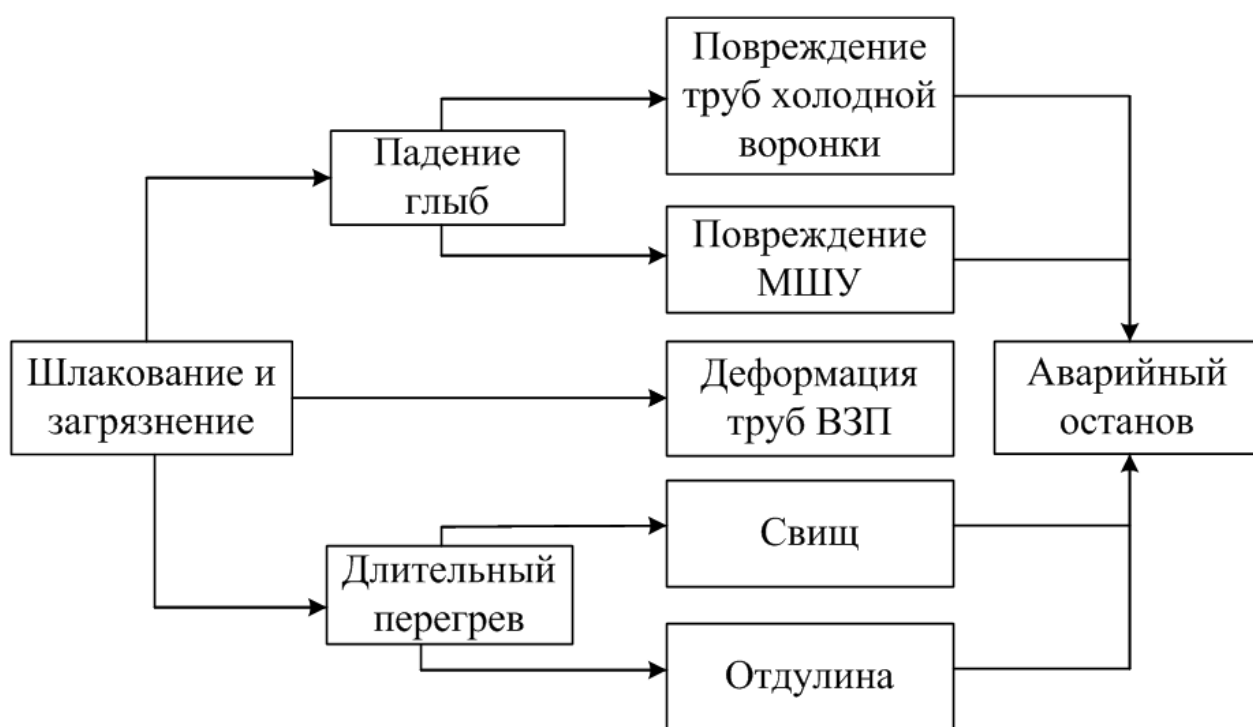


Рисунок 2.4 – Влияние шлакования и загрязнения на надежность работы

При интенсивном росте уровня загрязнения конвективных поверхностей нагрева наступает ограничение производительности котельного агрегата по тяге, связанное с возрастающим аэродинамическим сопротивлением конвективных пакетов в связи с перекрытием межтрубного пространства отложениями. В целом, влияние представленных выше отрицательных факторов приводит к перерасходу топлива из-за снижения КПД котлов, снижению беспыльчатой мощности (рисунок 2.5 б), увеличению выбросов золы и оксидов азота (рисунок 2.5 а), снижению надежности и ресурса располагаемого оборудования, а также повышению издержек на ремонт и ручную расшлаковку котлов. Данные обстоятельства могут привести к понижению номинальной производительности котельных агрегатов.

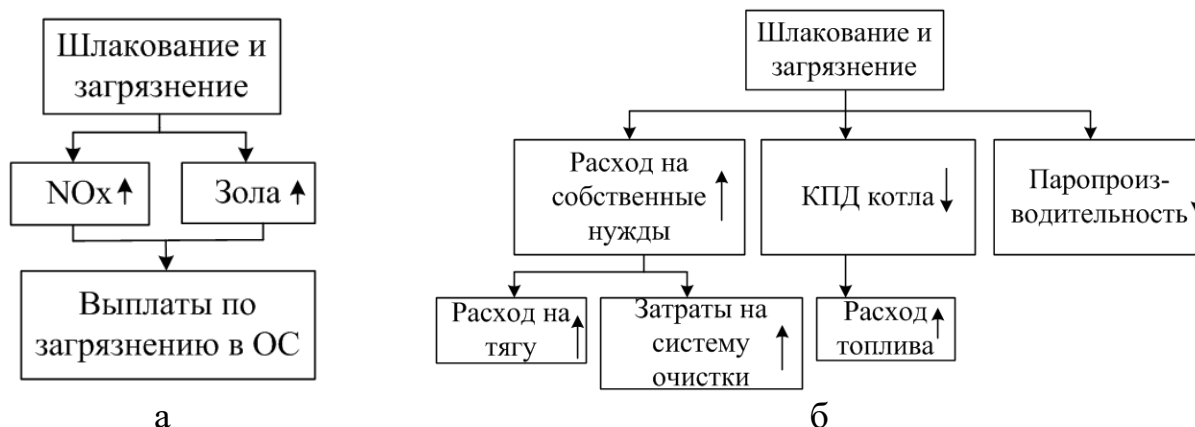


Рисунок 2.5 – Негативное влияние процессов шлакования и загрязнения на; а – экологические показатели работы котла; б – технико-экономические показатели работы котла

На рисунке 2.6 изображена холодная воронка котельного агрегата П-49 Назаровской ГРЭС, где наблюдается шлакование вокруг амбразур пылеугольных горелок и в углах топки. В центральной части образовалась глыба шлака, в эксплуатации приводит к нарушению внутри топочной аэродинамики, факел переходит на «фонтанное» движение.



Рисунок 2.6 – Шлаковые отложения в нижней части топки

На рисунке 2.7 наблюдается шлакование верхней части ширм и межширмового пространства. Большие наросты обвалились, видны разрихтованные и поведенные трубы.

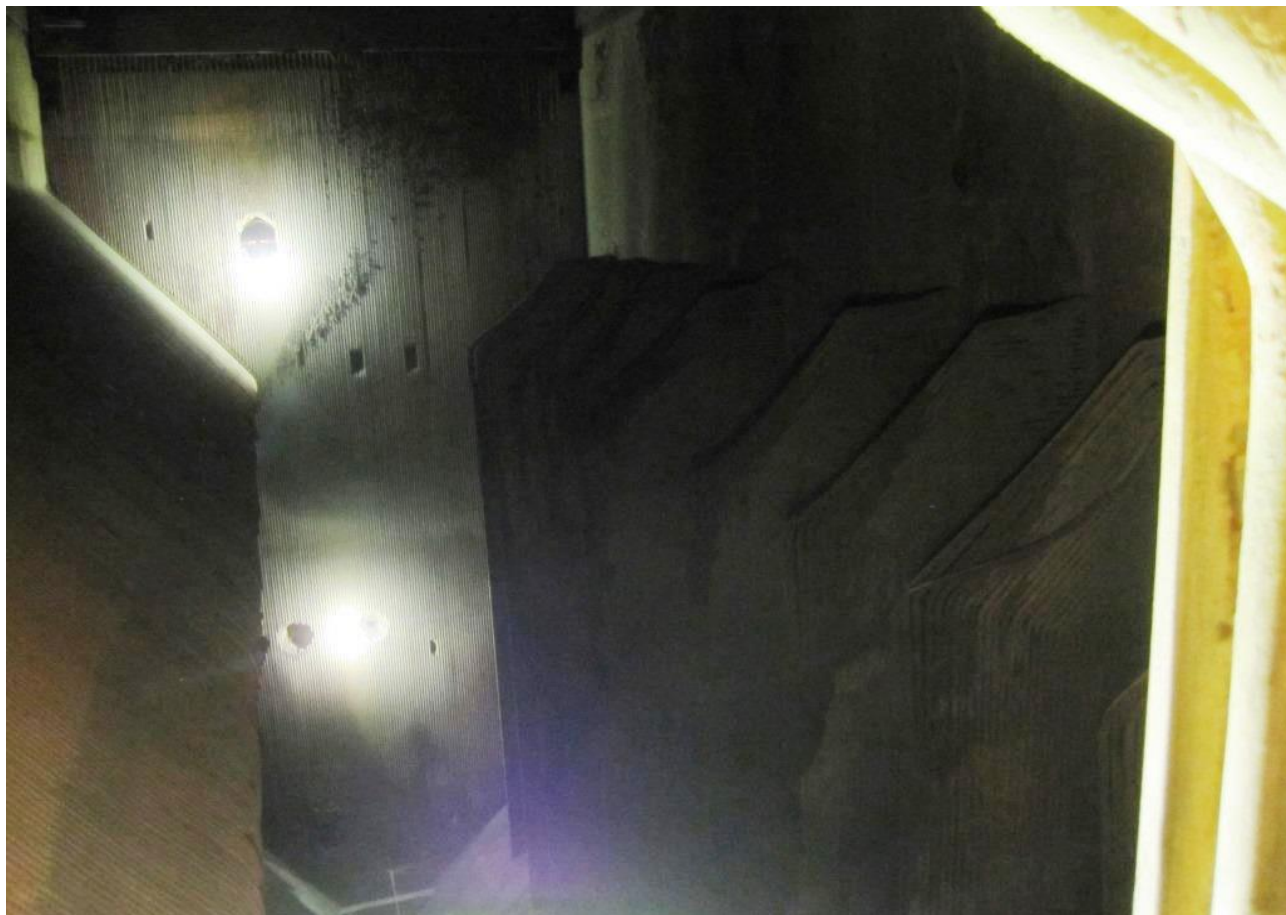


Рисунок 2.7 – Шлаковые наросты обвалились, видны разрихтованные и поведенные трубы

Основываясь на выше изложенном, можно сделать вывод о том, что борьба с интенсивным загрязнением и шлакованием является одним из определяющих факторов обеспечения надежной эксплуатации парового котла, работающего на твердом топливе.

2.3 Влияние наружных отложений на показатели и работу котла

От интенсивности образования на трубах наружных отложений и уровня их стабилизации зависят такие показатели работы котлов, как коэффициент полезного действия (КПД) и беспшлаковочная мощность. Снижение КПД котла приводит к перерасходу топлива, а уменьшение беспшлаковочной мощности сокращает производство и реализацию дополнительной электроэнергии [70—80, 82].

За рубежом широко распространено деление образования наружных отложений на шлакование и загрязнение. Под шлакованием обычно понимается процесс образования отложений в топке, а под загрязнением - в конвективных поверхностях нагрева (пароперегреватель, экономайзер, воздухоподогреватель).

Давно известно и подтверждено многочисленными исследованиями существование критической температуры газов, названной температурой начала шлакования ($T_{шл}$), выше и ниже которой отложения существенно отличаются по составу, свойствам и скорости роста. К шлакованию мы относим процесс образования отложений при температурных условиях выше $T_{шл}$, а к загрязнению – при более низких температурах газов.

Отложения отличаются по механизму, скорости формирования, прочности, составу. Они условно подразделяются на следующие типы:

- шлаковые;
- прочные железистые;
- сульфатно-кальциевые;
- отложения, образующиеся на базе активных щелочей и рыхлые (мелкодисперсные).

Последние три типа относятся к селективно обогащенным отложениям.

Шлаковые отложения — это наиболее быстрорастущие отложения, которые формируются при налипании частиц при температуре выше температуры начала шлакования $T_{шл}$. На охлаждаемых поверхностях нагрева шлакование, как правило, имеет стадийный характер. Первоначально образуются селективно-обогащенные отложения, которые для зон котла с температурой газов выше температуры начала шлакования называются первичными. По мере роста первичных отложений температура их поверхности возрастает, и с определенного момента формируются собственно шлаковые отложения.

Железистые отложения образуются медленно путем налипания при температуре газов свыше 900°C и обладают высокой прочностью. В зоне температур газов выше температуры начала шлакования железистые отложения формируются в виде первичного слоя. Определяющую роль в образовании железистых отложений играет пиритное железо или количество пиритной (сульфидной) серы в пересчете на зольный остаток. Образование железистых отложений, обогащенных Fe_2O_3 до 80% на экранах и до 65% на ширмах и пароперегревателе при температуре газов свыше 900°C происходит как в

топках с жидким, так и с твердым шлакоудалением. Темп их образования и прочность выше в топках с твердым шлакоудалением. Чем меньше склонность к образованию железистых отложений, тем меньше прочность отложений в топке и выше эффективность очистки топочных экранов.

Сульфатно-кальциевые отложения – прочные, медленно растущие отложения на конвективных поверхностях нагрева, которые при отсутствии эффективной обдувки упрочняются во времени за счет процессов сульфатизации. Сульфатно-кальциевые отложения относительно медленно упрочняются во времени, поэтому их удаление современными средствами очистки в сыпучем или рыхлом виде наиболее предпочтительно.

Отложения на базе активных щелочей образуются при сжигании "соленых" углей и при сжигании углей, рассматриваемых в настоящей работе, не встречаются.

Оценка шлакующих и загрязняющих свойств (ранжирование) углей выполнена с использованием показателей, рассчитываемых по химическому составу зольного остатка, как для отдельных проб, так и для среднего состава (по программе ВТИ-УралВТИ «Coral»).

Экспертная оценка шлакующих и загрязняющих свойств энергетических топлив основывается на анализе поведения минеральной части при пылеугольном сжигании и выполняется по следующим параметрам:

- рейтингу топлива, дающему качественную оценку склонности топлива к шлакованию поверхностей нагрева и образованию золовых отложений;
- температуре начала шлакования;
- предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей) расчетных реперных температур газов в котле и тепловых напряжений сечения топки.

Шлакующие и загрязняющие свойства топлив определяются и оцениваются в зависимости от физико-химических характеристик топлива и состава его минеральной части (зольного остатка).

Таблица 2.1 – Результаты экспертной оценки шлакующих свойств и смесей

| Уголь | Показатели | | | | | | | | |
|---------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|------|---------------|
| | R_{fe} | R_{na} | R_{ca} | $R_{TЭ}$ | $R_{ин}$ | $T_{шл}$ | $T_T "$ | fS | $SiO_2_{экв}$ |
| Бородинский | 0,55 | 0,23 | 0,73 | 0,75 | 0,72 | 965 | 1145 | 0,84 | 62 |
| Канский | 0,75 | 0,28 | 0,76 | 0,86 | 0,92 | 975 | 1085 | 0,69 | 43 |
| Черногорский | 0,48 | 0,32 | 0,38 | 0,64 | 0,58 | 1005 | 1185 | >1 | 72 |
| Изыхский | 0,33 | 0,35 | 0,45 | 0,67 | 0,7 | 970 | 1150 | >1 | 63 |
| Экибастузский | 0,1 | 0,23 | 0,4 | 0,44 | 0,43 | 1055 | 1230 | >1 | 79 |
| Переясловский | 0,66 | 0,28 | 0,67 | 0,8 | 0,72 | 965 | 1145 | н/д | 50 |
| Харанорский | 0,45 | 0,27 | 0,54 | 0,63 | 0,64 | 990 | 1170 | >1 | 76 |
| Назаровский | 0,71 | 0,29 | 0,84 | 0,85 | 0,74 | 1005 | 1140 | н/д* | 30 |
| Элегестинский | 0,54 | 0,37 | 0,53 | 0,76 | 0,74 | 960 | 1140 | >1 | 44 |
| Березовский | 0,64 | 0,31 | 0,82 | 0,82 | 0,81 | 990 | 1115 | н/д* | 35 |

где R_{fe} – индекс загрязнения Fe – отложениями;

R_{na} – индекс загрязнения Na – отложениями;

R_{ca} – индекс загрязнения Ca – отложениями;

$R_{TЭ}$ – индекс шлакования топочных экранов;

R_{un} – индекс шлакования полурадационных поверхностей;

T_{un} – температура начала шлакования;

T_T – температура на выходе из топки (допустимая);

Шлакующие и загрязняющие свойства (зарубежные оценки);

fS – индекс шлакования по методу Альтмана;

$SiO_2 экв$ – индекс шлакования по методу «Эквивалентный кремний» ;

Ранги свойств (качественная оценка уровня свойств):

Н – низкий; **С** – средний; **В** – высокий; **ОВ** – очень высокий.

НШ – нешлакующее топливо; **Ш** – шлакующее топливо; **СШ** – сильно шлакующее топливо.

В связи с тем, что угольное топливо в балансе ТЭС постепенно начинает отвоевывать доминирующие позиции у природного газа, разработка методов борьбы с интенсивным шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева котлов остается актуальной.

В настоящее время экспертная оценка изменения качества топлива не дает возможность определить изменение тепловосприятия различных поверхностей нагрева паровых котлов. В связи с этим возникает необходимость в создании зависимости, с помощью которой определялась бы величина изменения тепловосприятия поверхностей нагрева по причине изменения качества топлива. Кроме того, опыт эксплуатации показывает, что значения коэффициентов тепловой эффективности и загрязнения, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений, что, как следствие, приводит к повышению проектных рисков (подтверждение гарантийных показателей) и ограничению номинальной паропроизводительности котла вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева допустимых значений. В связи с этим для повышения надежности эксплуатации паровых котлов необходимо выявить и обосновать факторы, влияющие на показатели тепловой эффективности при сжигании различных топлив в зависимости от типа и конструктивных характеристик поверхностей нагрева котельных агрегатов.

Как показала практика создания, внедрения и эксплуатации методов и средств по обеспечению тепловой эффективности поверхностей нагрева паровых котлов исходя из соотношения качества получаемого результата и стоимости реализации наиболее предпочтительным считается комплексный подход, при котором зоны эффективной очистки поверхностей нагрева рассчитываются при проектировании котла с определением минимально допустимых поперечного и продольного шага труб конвективных поверхностей нагрева. Данные системы получили широкое применение не

только за рубежом, но и успешно эксплуатируются на отечественных электростанциях. Например, система диагностики шлакования и автоматического управления обдувочными аппаратами «FACOS» немецкой фирмы «Clyde-Bergemann GmbH» установлена на таких котлах, как П-67 Березовской ГРЭС и ПК-39 Рефтинской ГРЭС. Применение системы «FACOS» на котле П-67 позволило повысить КПД на 1 % и повысить беспшлаковочную мощность более, чем на 50 МВт. Тем не менее, как показывает практика эксплуатации, в таких системах не учитывается ряд факторов, которые в свою очередь могут повлиять на эффективность их работы и котельного агрегата в целом. При этом высокая стоимость зарубежных систем диагностики приводит к необходимости создания отечественных систем, работающих в режиме реального времени, которые бы учитывали конструктивные особенности, как отдельной поверхности нагрева, так и их совокупности, эксплуатационные факторы и особенности работы вспомогательного оборудования.

Выбор объектов исследований объясняется: наличием большого количества развитых полурадационных и конвективных поверхностей нагрева; использованием на исследуемых котлах современных АСУ ТП, что позволяет определять изменение показателей тепловой эффективности в режиме реального времени; применением современных средств очистки от наружных отложений поверхностей нагрева, что дает возможность проводить независимую оценку эффективности проведения очистки каждой поверхности нагрева котла.

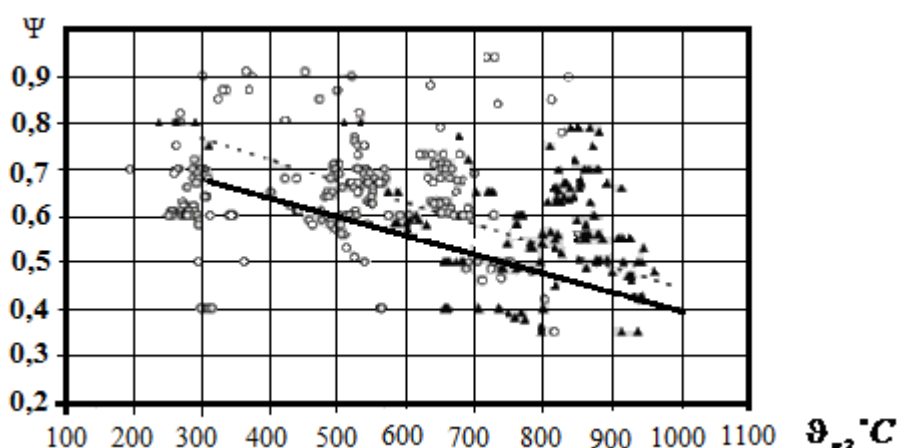
Полученные результаты экспертных оценок шлакующих свойств углей объектов исследований, подтверждаются опытом эксплуатации. Как показывает опыт, сжигания березовских, назаровских, ирша-бородинских и переясловских углей сопровождается интенсивным шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева. Однако свойства образующихся наружных отложений при сжигании данных углей значительно отличаются между собой. Сжигание березовского угля сопровождается образованием прочных трудноудаляемых отложений. Сжигание назаровского и переясловского углей сопровождается образованием рыхлых отложений, удаление которых происходит при резких разгрузках котлов. Сжигание экибастузского угля сопровождается умеренным загрязнением поверхностей нагрева. Из-за низкого содержания оксидов железа и кальция при сжигании данного угля происходит саморасшлаковка котлов при изменении их паропроизводительности.

2.4 Основные характеристики и экспертная оценка шлакующих свойств углей

Борьба с шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева котлов начинается уже на стадии проектирования.

При проектировании котельных агрегатов в качестве критерия шлакования и загрязнения поверхностей нагрева традиционно используют коэффициенты тепловой эффективности (Ψ) и загрязнения (ε). Значения указанных показателей рекомендованы в НТР, а выбор их численных значений

определяется в зависимости от типа конструкции поверхности нагрева и вида сжигаемого топлива. В основу данных рекомендаций положены результаты экспериментальных исследований коллективов авторов, представляющих такие организации как ОАО «ВТИ» (г. Москва) и НПО ЦКТИ (г. Санкт-Петербург) [22]. Однако, как показывает опыт эксплуатации, значения коэффициентов тепловой эффективности и загрязнения, полученные на действующих котельных агрегатах, значительно отличаются от рекомендованных нормативных значений (рисунок 2.8), что, как следствие, приводит к повышению проектных рисков (подтверждение гарантийных показателей) и ограничению номинальной паропроизводительности котла вследствие превышения температур металла труб поверхностей нагрева допустимых значений. Следует отметить, что в нормативных материалах представлена зависимость изменения коэффициентов тепловой эффективности и загрязнения от температуры газов для различных твердых органических топлив, при этом классификация топлив представлена недостаточно корректно. Так же не показано влияние средств очистки на изменение нормативных коэффициентов поверхностей нагрева. Кроме того, проектные значения коэффициентов представлены только для номинальной паропроизводительности и отсутствуют объективные рекомендации для их выбора при пониженных нагрузках котла. Однако, эти зависимости крайне необходимы, так как при проектировании котельных агрегатов тепло- гидравлические расчеты производятся на весь диапазон режимов их работы. Указанные выше недостатки существующего подхода могут повлиять на надежность и экономичность работы паровых котлов на всех диапазонах нагрузок. В связи с этим для повышения надежности эксплуатации паровых котлов необходимо выявить и обосновать факторы, влияющие на показатели тепловой эффективности при сжигании различных топлив в зависимости от типа и конструктивных характеристик поверхностей нагрева котельных агрегатов.



«- - -» - нормативная кривая для умеренно загрязняющих и сильно загрязняющих с очисткой; «—» - нормативная кривая для сильно загрязняющих без очистки; «—▲—» - поверхность с очисткой; «-o-» - поверхность без очистки

Рисунок 2.8 — Коэффициенты тепловой эффективности конвективных поверхностей нагрева паровых котлов при сжигании канско-ачинских углей [23]

Кроме того, для предотвращения ошибок на стадии проектирования используют экспертную оценку влияния качества угля на технико-экономические показатели работы пылеугольных котлоагрегатов. По экспертным оценкам, выполненным в США, факторы качества угля могут стать причиной аварийных остановов пылеугольных котлов почти в 60% случаев. Одним из направлений данной экспертной системы является оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей.

Основными физико-химическими характеристиками топлива являются:

- полный элементный состав топлива;
- теплота сгорания топлива;
- содержание кислых и основных компонентов минеральной части топлива.

Более достоверная оценка достигается при дополнительном использовании данных специальных анализов топлива и его минеральной части, включающих:

- содержание пиритной серы в элементном составе топлива (S_p) либо содержание в минеральной части топлива растворимого в азотной кислоте железа ($Fe_2O_3^{раств}$);
- содержание в минеральной части топлива ионообменного либо водорастворимого натрия;
- содержание в минеральной части топлива связанного карбонатного кальция.

Для ряда групп топлив из отдельных месторождений или бассейнов (так называемых нормированных групп топлив) по результатам проведенных экспериментальных исследований получены обобщающие, усредненные зависимости для расчета содержания в них пиритной серы в функции от содержания общей серы. Последние дополнительно используются для анализируемого топлива в тех случаях, когда отсутствуют данные о содержании в нем S_p , либо $Fe_2O_3^{раств}$, и при условии, что это топливо входит в какую-либо из нормированных групп топлив. Для некоторых нормированных групп топлив аналогичная оценка может быть выполнена и для ионообменного натрия.

Рейтинг топлива оценивается по следующим основным показателям загрязнения:

- склонности топлива к образованию на поверхностях нагрева наиболее трудноудаляемых видов золовых отложений:
 - железистых (Fe-отложений),
 - натриевых (Na-отложений, на основе активных щелочей),
 - сульфатно-кальциевых (Ca-отложений);
- склонности топлива к шлакованию:
 - топочных экранов (ТЭ-шлакование),
 - полурadiaционных (ширмовых) поверхностей нагрева (ПР-шлакование).

При оценке склонности топлива к шлакованию поверхностей нагрева прогнозируется общий характер загрязнения для всех видов золовых отложений, образующихся на указанных поверхностях нагрева котлов.

Ранжирование топлив осуществляется по четырем группам рейтинга: низкий (Н), средний (С), высокий (В) и сверхвысокий (ОВ), качественно определяющим характер возможного загрязнения.

Группа рейтинга определяется для каждого показателя загрязнения по индивидуальным безразмерным шкалам (коэффициентам) рейтинга (R), представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Группа рейтинга определяется для каждого показателя загрязнения

| Коэффициент рейтинга | Рейтинг топлива | | |
|----------------------|-----------------|------|------|
| | Н | С | В |
| R_{fe} | 0,20 | 0,50 | 0,72 |
| R_{na} | 0,40 | 0,50 | 0,70 |
| R_{ca} | 0,42 | 0,60 | 0,79 |
| $R_{mэ}$ | 0,42 | 0,62 | 0,75 |
| R_{np} | 0,30 | 0,52 | 0,69 |

Значения коэффициентов рейтинга зависят от физико-химических характеристик топлива и его минеральной части, а также от режима сжигания топлива в котле. Расчеты коэффициентов рейтинга, а также анализ влияния указанных факторов на значения рейтинга производятся по зависимостям коэффициентов рейтинга от расчетных рейтинговых параметров (К.). Рейтинговые параметры представляют собой безразмерные комплексы, рассчитываемые по содержанию тех элементов состава топлива, компонентов минеральной части и параметров котла, которые определяют рассматриваемый показатель загрязнения.

Топлива, имеющие одинаковые или близкие друг к другу значения рейтинговых параметров, будут давать примерно одинаковый характер загрязнения поверхностей нагрева (для рассматриваемого показателя загрязнения). По отдельным показателям загрязнения рейтинговые параметры зависят от следующих факторов, которые представлены в таблице 2. 3.

Таблица 2.3 — Основные факторы рейтингов характеристик отложений

| Наименование | Рейтинговый параметр | Факторы влияния | Основные факторы |
|---------------|--------------------------|-----------------------------------|---|
| Fe-отложения | R_{fe} | $S_p, Fe_2O_3, T_a, \alpha_{гор}$ | содержание пиритной серы адиабатическая система сгорания |
| Na-отложения | R_{na} | $Na_2O^{раств}$ | содержание ионообменного натрия |
| Ca-отложения | R_{ca} | $Ca_2O^{раств}$ | содержание связанного карбонатного кальция |
| ТЭ-шлакование | $R_{тэ}$ | $R_{fe}, K/O$ | содержание пиритной серы отношение кислых и основных оксидов адиабатическая температура сгорания избыток воздуха в основных горелках |
| ПР-шлакование | R_{np}, R_{fe}, R_{ca} | $K/O, Na_2O$ | содержание пиритной серы отношение кислых и основных оксидов содержание оксида натрия адиабатическая температура сгорания избыток воздуха в основных горелках |

Определяющими для всех показателей загрязнения являются физико-химические характеристики топлива. С ростом указанных в факторах влияния компонентов (для К/О с ростом содержания основных оксидов) склонность топлива к образованию золовых отложений и шлакованию увеличивается (повышается рейтинг топлива).

В меньшей степени оказывают влияние параметры котла, причем склонность топлива к образованию натриевых и сульфатно-кальциевых отложений не зависит от режима сжигания топлива. Рост адиабатической температуры сгорания повышает склонность топлива к шлакованию поверхностей нагрева. При ступенчатом сжигании топлива с избытками воздуха в основных горелках меньше единицы, в общем случае происходит усиление шлакования.

Дополнительно, при нормированных параметрах проводится сопоставление анализируемого и нормированных топлив по отдельным показателям загрязнения и ранжирование их в зависимости от расчетных рейтинговых параметров. На основе этого для анализируемого топлива могут быть определены аналоги топлива, дающие при сжигании примерно такой же характер загрязнения поверхностей нагрева (для рассматриваемого показателя загрязнения). Топлива-аналоги подбираются отдельно для каждого показателя загрязнения из тех нормированных топлив, которые имеют близкое к анализируемому значение рейтингового параметра. Следует отметить, что анализ нормированных топлив проводился по отдельным пробам, которые не во всех случаях могут представительно характеризовать весь диапазон изменений свойств того или иного нормированного топлива.

Оценка количественных показателей, характеризующих шлакующие свойства энергетических топлив и используемых при проектировании и наладке котлов, производится для следующих температурных реперов:

- температуре начала шлакования ($T_{шл}$);
- предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей нагрева) расчетных температур газов: температуре на выходе из топки (T_T) и на входе в конвективную шахту котла ($T_{ки}$).

Температура начала шлакования в основном зависит от состава минеральной части топлива (отношения кислых и основных оксидов). Определение $T_{шл}$ производится по базовой зависимости, полученной по экспериментальным данным для нормированных топлив, с дополнительной поправкой в случае сжигания анализируемого топлива с низкими избытками воздуха в основных горелках.

Ступенчатое сжигание топлив (с золой кислого состава) с избытками воздуха в основных горелках, меньшими единицы, приводит к снижению $T_{шл}$ и усилению шлакующих свойств топлива. Последнее особенно заметно при снижении $T_{шл}$ на 15 °С по отношению к базовой зависимости.

Предельно допустимое значение температуры на выходе из топки определяется как $T''_{\tau} = T_{шл} + \Delta T$. Расчетная прибавка ΔT , также как и $T_{шл}$, зависит в основном от состава минеральной части топлива, но в определенной степени могут оказывать влияние содержание пиритной серы и адиабатическая температура сгорания топлива.

При сравнительно небольших значениях рейтингового параметра R_{ca} (не более 0,4) предельно допустимое значение температуры на входе в конвективную шахту котла оценивается в зависимости от К/О. При больших значениях R_{ca} допустимое значение этой температуры целиком определяется интенсивностью образования сульфатно-кальциевых отложений.

В настоящее время в качестве борьбы с интенсивным загрязнением и шлакованием в процессе эксплуатации паровых котлов существует несколько подходов к решению данных задач, которые можно классифицировать на

активные и пассивные. Суть активных методов заключается в совершенствовании топочно- горелочных устройств, а также компоновки и конструктивного исполнения различных поверхностей нагрева котельных агрегатов [28-33]. В свою очередь, пассивные методы направлены на использование в пылеугольных котлах средств очистки с комплексными системами технической диагностики. Как показала практика создания, внедрения и эксплуатации методов и средств по обеспечению тепловой эффективности поверхностей нагрева паровых котлов исходя из соотношения качества получаемого результата и стоимости реализации, наиболее предпочтительным считается комплексный подход, при котором зоны эффективной очистки поверхностей нагрева рассчитываются при проектировании котла с определением минимально допустимых поперечного и продольного шага труб конвективных поверхностей нагрева.

2.5 Варианты решения и их обоснование по борьбе со шлакованием поверхностей нагрева

Вариант 1 – дополнительная установка обдувочных аппаратов.

На сегодняшний день на существующих отечественных котлах широкое распространение борьбы с интенсивным шлакованием и загрязнением получил пассивный метод, в виде установки средств очистки поверхностей нагрева. Средства очистки были разработаны более чем столетие назад, как способ уменьшения роста отложений во время работы котельного агрегата. За это время было разработано большое количество видов средств очистки, отличающихся как конструктивом, так и выбором среды очистки (рисунок 2.9) [34-52].

Это обдувка: паровая, воздушная, водяная (обмывка), виброочистка, дробеочистка, импульсная очистка. Паровая (или воздушная) обдувка – один из наиболее распространенных и освоенных в эксплуатации методов очистки наружной поверхности труб. Ее производят посредством струи, действие которой, в связи с этим, необходимо все стороны рассмотреть. Несмотря на то, что обдувка должна носить профилактический характер, в процессе эксплуатации нередко появляется необходимость в удалении сформировавшихся отложений.

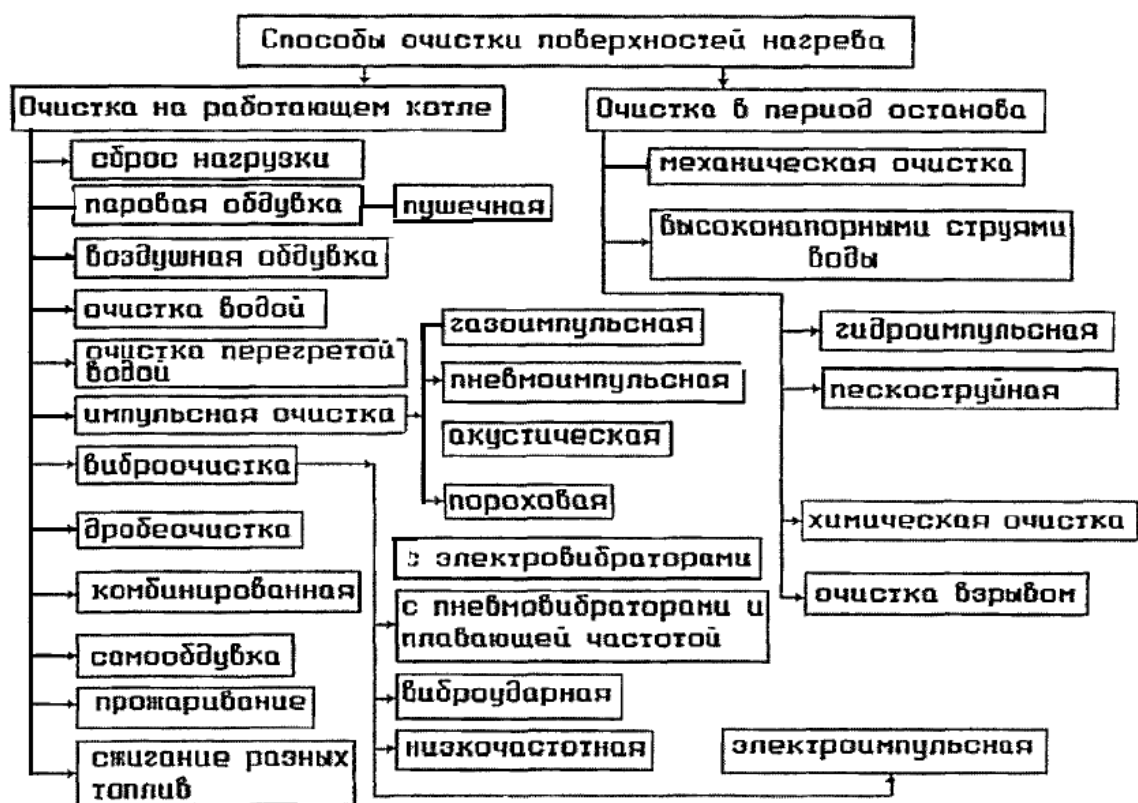


Рисунок 2.9 — Существующие способы очистки поверхностей нагрева пылеугольных котельных агрегатов

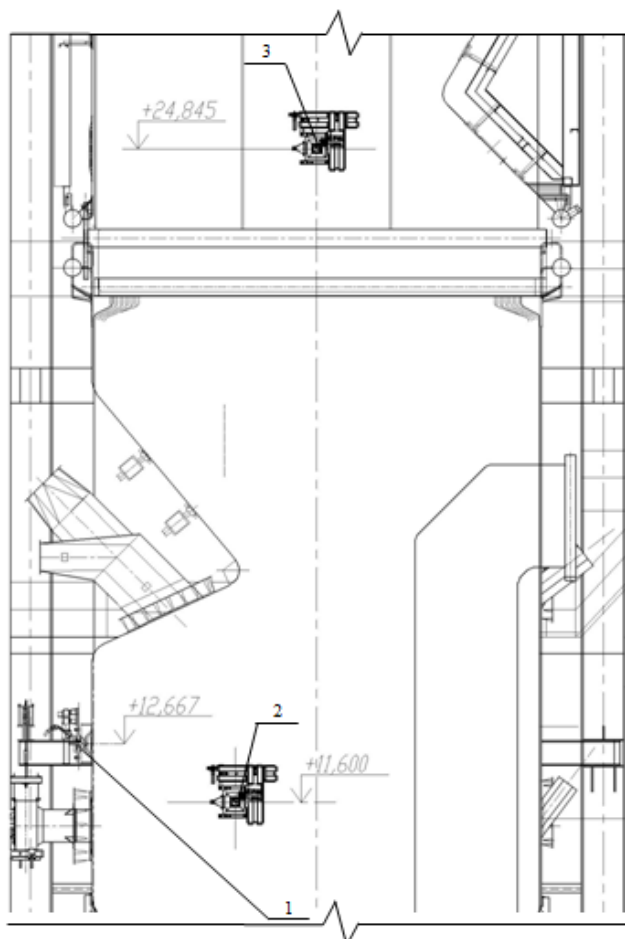
Такое решение не является выходом из данной ситуации, потому что на котельном агрегате обдувка делается качественно, позиции и количество аппаратов обдувки выбраны соответствующе.

Для очистки от золовых и шлаковых отложений поверхностей нагрева котла П-49 применяются аппараты водяной и паровой очистки.

Для очистки экранов топки каждого корпуса применяется 10 дальнобойных водных пушек WLB-CB100, которые устанавливаются:

- по одному аппарату на боковых стенах топки на отметке 11,400 м;
- по одному аппарату на боковых стенах топки на отметке 23,500 м;
- шесть аппаратов на фронтальной стене топки на отметке 12,770 м.

Схема установки аппаратов водяной очистки приведена на рисунке 2.10.



1 – дальнобойная водяная пушка на фронтальной стене НРЧ (6 штук); 2 – дальнобойная водяная пушка на боковой стене НРЧ; 3 – дальнобойная водяная пушка на боковой стене СРЧ

Рисунок 2.10 – Схема установки аппаратов водяной очистки WLB-CB100

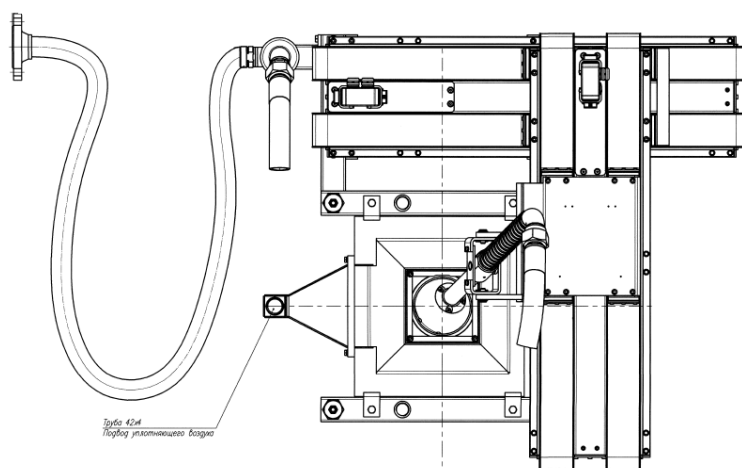


Рисунок 2.11 – Дальнобойная водяная пушка WLB-CB100 производства «Clyde-Bergemann»

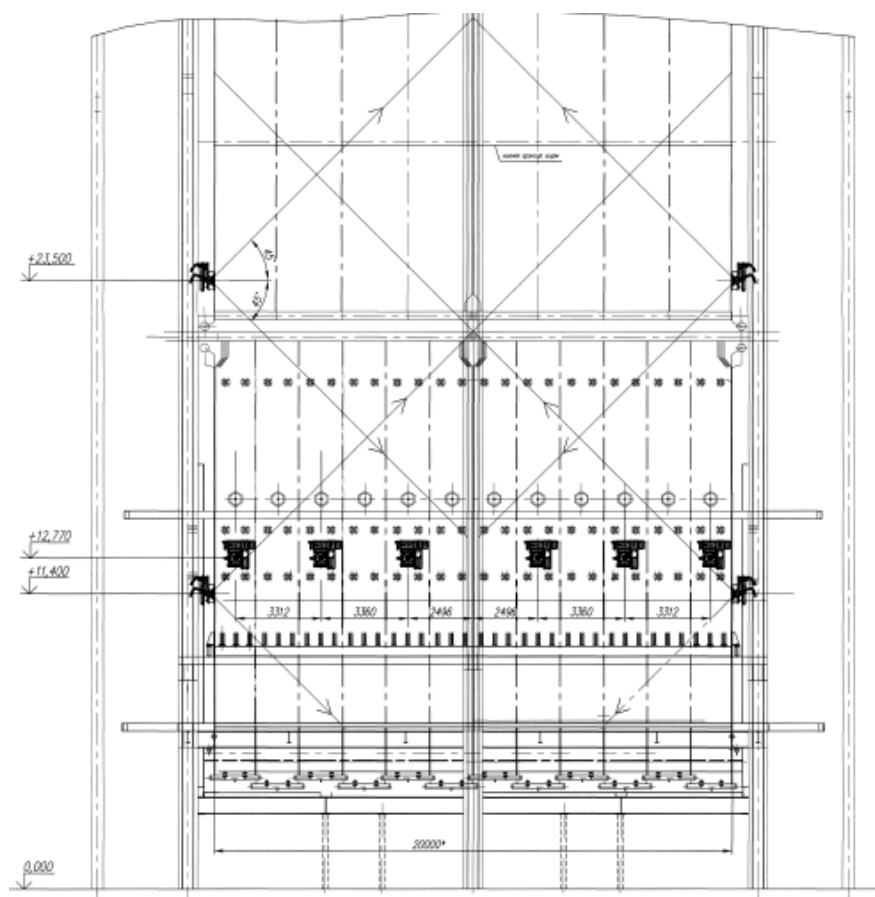


Рисунок 2.12 – Расположение аппаратов водяной очистки WLB-CB100;

Паровая обдувка – один из наиболее распространенных и освоенных в эксплуатации методов очистки наружной поверхности труб. Ее производят посредством струи, действие которой, в связи с этим, необходимо все стороны рассмотреть.

Для очистки ширм первичного пароперегревателя 1,2 и 3ступеней и топочных экранов верхней части топки предусмотрена установка 4-х глубоко выдвижных паровых обдувочных аппаратов PS-LL длиной 11,500 мм и 10-и паровых пушек V92.

Глубоковыводящие аппараты PS-LL установлены на боковых стенах топки между рядами ширм, показаны на рисунке 2.13 и 2.15. Они характеризуются двухсопловой головкой, винтовым полнооборотным или секторным движением обдувочной трубы с вводом/выводом её из газохода.

Десять паровых пушек V92 устанавливаются на фронтальной стене корпуса А на отметке 29,210м, рисунок 2.14. Корпус Б паровыми пушками не оснащается, так как ширмы корпуса Б полностью чистятся глубоковыдвижными аппаратами.

В качестве агента для обдувки используется вода и перегретый пар соответственно.

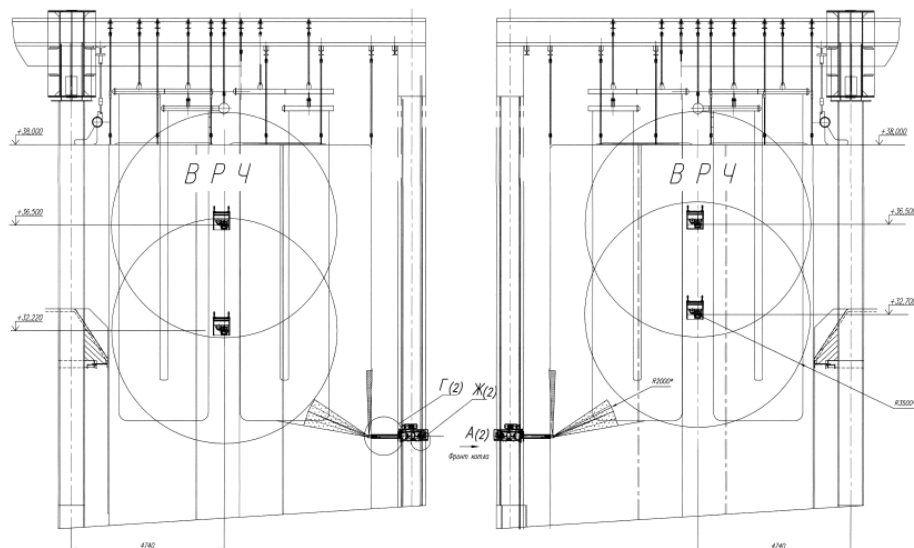


Рисунок 2.15 – Аппараты паровой очистки PS-LL и V92 производства «Clyde-Bergemann»

Вариант 2 – изменение топочного объёма, реконструкция котла.

В 2011...2013 гг. по проекту ОАО «ЗИОМАР» и ООО «Компания «НТВ-энерго» выполнено техническое перевооружение котла на НТВ технологию сжигания и твердое шлакоудаление.

Так как котельный агрегат, совсем недавно, подвергался глобальной реконструкции, отсюда следует, что реконструкция не уместна.

Основными задачами при модернизации котлов являлись:

- резкое снижение загрязнения поверхностей нагрева и повышение бесшлаковочной мощности до номинальной (а при необходимости и более);
- обеспечение высокой экономичности сжигания твердого топлива при изменении его теплотехнических характеристик в широких пределах;
- снижение вредных выбросов до нормативного уровня;
- повышение мощности блока до 500 МВт;
- обеспечение работы котла в диапазоне нагрузок (от 0,6 до 1.0)Дн без шлакования поверхностей нагрева;
- обеспечение работы котла во всем диапазоне нагрузок без подсветки мазутом;
- обеспечение КПД (брутто) на уровне 91 %;
- снижение выбросов оксидов азота.

Из вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что не все задачи получилось реализовать. Тем самым, борьба со шлакованием и загрязнением поверхностей нагрева остается актуальной для данного котельного агрегата и требует поиск решений по увеличению бесшлаковочного режима работы.

Вариант 3 – перевод котельного агрегата на бурый уголь, в котором содержание минеральной части ниже, чем в Назаровских углях. Такая задача разработана для котельного агрегата, после перевода на НТВ технологию сжигания.

Основная проблема заключается в том, что Назаровский угольный разрез имеет огромные запасы бурого угля, близкое расстояние транспортировки топлива на угольный склад.

Вариант 4 – Система технической диагностики. Позволяет снизить затраты на проведение котлоочистных мероприятий, повысить экономичность и надежность работы оборудования.

Усовершенствована система технической диагностики процессов шлакования и загрязнения полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева в режиме реального времени, позволяющая определить уровень загрязнения, как отдельной поверхности нагрева с учетом их индивидуальной компоновки, так и котла в целом, а также обеспечить оптимальный режим их очистки. Применение очистки по необходимости, дополнительная информация о состоянии топки, уменьшение частоты применения обдувок на 30%, щадящий режим работы поверхностей нагрева топки, надежная работа, увеличение времени работы котла.

Современное состояние контроля, регулирования и управления основными параметрами топочного процесса на тепловых электростанциях не отвечает в полной мере возросшим требованиям, предъявляемым к надежности, маневренности и экономичности работы котельных агрегатов. В связи с этим все большее развитие получают системы технического диагностирования (СТД) работы энергетического оборудования. Их разработка и внедрение на основе методов и средств детального анализа, непрерывного контроля и диагностики топочных процессов позволяют повысить надежность и качество эксплуатации. При этом наиболее эффективными в плане снижения необходимого числа измеряемых параметров, повышения информативности и экстраполяционных возможностей являются системы технического диагностирования, в которых информация, получаемая за счет текущих измерений на работающей топке, дополняется учетом взаимосвязей режимных параметров с показателями локального и интегрального теплообмена, получаемых путем математического моделирования топочных процессов.

В настоящее время на отечественных станциях используется система диагностики шлакования и автоматического управления обдувочными аппаратами «FACOS» немецкой фирмы «Clyde-Bergemann GmbH», установленная на таких котлах, как П-67 (ст. №1) Березовской ГРЭС и ПК-39 (ст. №6Б) Рефтинской ГРЭС. Применение системы «FACOS» на котле П-67 (ст. №1) позволило повысить КПД котла на 1 % и увеличить бесшлаковочную мощность более, чем на 50 МВт. Тем не менее, как показывает практика эксплуатации, в таких системах не учитывается ряд факторов, которые в свою очередь могут повлиять на эффективность их работы и котельного агрегата в целом. При этом высокая стоимость зарубежных систем диагностики приводит к необходимости создания отечественных систем, работающих в режиме реального времени, которые бы учитывали конструктивные особенности как отдельной поверхности нагрева, так и их совокупности, эксплуатационные факторы и особенности работы вспомогательного оборудования.

3 Разработка методики исследования процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла П-49

3.1 Разработка методики и алгоритма определения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева парового котла в режиме реального времени

В настоящее время при проектировании и эксплуатации котлов в качестве оценки тепловой эффективности поверхностей нагрева используют коэффициент тепловой эффективности (ψ) или коэффициент загрязнения (ϵ). Данные коэффициенты являются тождественными с одной лишь разницей, что при абсолютной чистой поверхности коэффициент тепловой эффективности стремится к единице ($\psi \rightarrow 1$), а коэффициент загрязнения стремится к нулю ($\epsilon \rightarrow 0$).

На данный момент для расчета данных коэффициентов используют программу теплогидравлических расчетов котельных агрегатов («Тракт»), применяя метод подбора определяющих коэффициентов с использованием температур рабочей среды и продуктов сгорания на входе и выходе из каждой поверхности нагрева. Однако, в случае необходимости определения интенсивности загрязнения в режиме реального времени метод является трудоемким и недостаточно представительным. В связи с этим основной задачей является создание методики для определения коэффициентов загрязнения (тепловой эффективности поверхностей нагрева) в режиме реального времени. В основу данного алгоритма положено уравнение теплового баланса между греющей и нагреваемой средой, при известных температурах рабочей среды:

$$Q_{\text{факт}} = \phi(H' - H'') - Q_{\text{доп}} \frac{D_{\text{пе}}}{B_p}(h' - h'') - Q_{\text{л}} \quad (3.1)$$

где H', H'' – энтальпии газов до и после поверхности нагрева, кДж/кг;

$D_{\text{пе}}$ – расход рабочей среды, кг/с;

h', h'' – энтальпии рабочей среды до и после поверхности нагрева, кДж/кг;

$Q_{\text{доп}}$ – тепловосприятие дополнительных (прилегающих) поверхностей;

$Q_{\text{л}}$ – тепловосприятие поверхности нагрева излучением;

ϕ – коэффициент сохранения тепла.

В качестве характеризующей величины выбран коэффициент тепловой эффективности – ψ , как наиболее информативный.

Оценка коэффициента тепловой эффективности произвольной поверхности нагрева осуществляется по соотношению:

$$\psi = \frac{K_{\text{факт}}}{K} \quad (3.2)$$

где $K_{\text{факт}}$ – фактический коэффициент теплопередачи реальной поверхности нагрева $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

K – коэффициент теплопередачи для чистой поверхности (без учета коэффициента загрязнения), $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Фактический коэффициент теплопередачи в свою очередь для произвольно взятой поверхности нагрева определяется по уравнению:

$$K_{\text{факт}} = \frac{Q_{\text{факт}} B_p}{F \cdot \Delta t} \quad (3.3)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ;

Δt – среднелогарифмический температурный напор, $^\circ\text{C}$;

$Q_{\text{факт}}$ – фактическое тепловосприятие поверхности нагрева, $\text{кДж}/\text{кг}$;

B_p – расчетный расход топлива, $\text{кг}/\text{с}$.

Определение значений температурного напора (Δt , $^\circ\text{C}$) и фактического тепловосприятия поверхности нагрева ($Q_{\text{факт}}$, $\text{кДж}/\text{кг}$) осуществляется путем решения системы нелинейных балансовых уравнений при известных температурах теплоносителей, участвующих в теплообмене, как на входе, так и на выходе из каждой анализируемой поверхности, измеряемых системой штатного контроля котла.

Расчет тепловых характеристик поверхностей нагрева осуществляется в соответствии с Нормативным методом теплового расчета котельных агрегатов [17,22]. Методика оценки коэффициентов тепловой эффективности поверхностей представлена на рисунке 3.1.

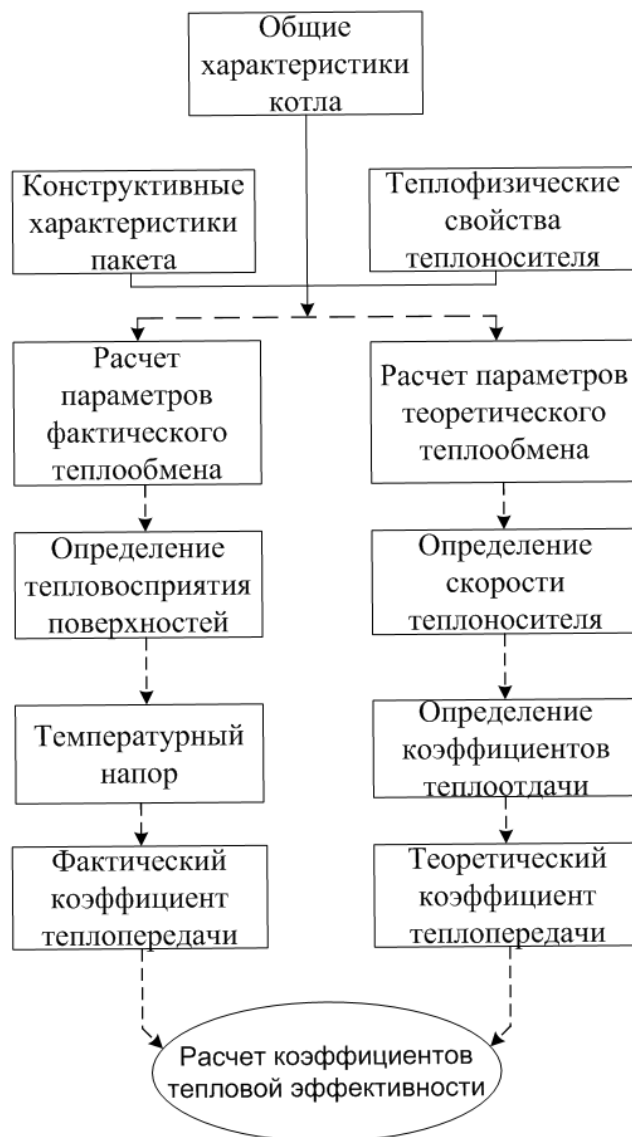


Рисунок 3.1 – Методика определения коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева котла

Особенностью методики и алгоритма оценки коэффициента теплопередачи для чистой поверхности нагрева (K , кВт/(м²·°C)) является его нахождение с учетом реальных эксплуатационных параметров работы котла, определяемых в режиме реального времени и характеристик сжигаемого топлива.

На основе усовершенствованной методики был разработан алгоритм определения коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева котлов. Данный алгоритм состоит из трех модулей:

- Основной модуль;
- Дополнительный модуль;
- Вспомогательный модуль.

Во вспомогательном модуле производится расчет основных параметров котла и теплофизических характеристик теплоносителя на входе и выходе из каждой поверхности.

В дополнительном модуле производится расчет необходимых характеристик, зависимости которых определены при помощи экспериментальных исследований. В основном модуле, непосредственно, определяется значение коэффициентов тепловой эффективности поверхности нагрева котельного агрегата.

Методика определения коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева котла представлена на рисунке 3.2.

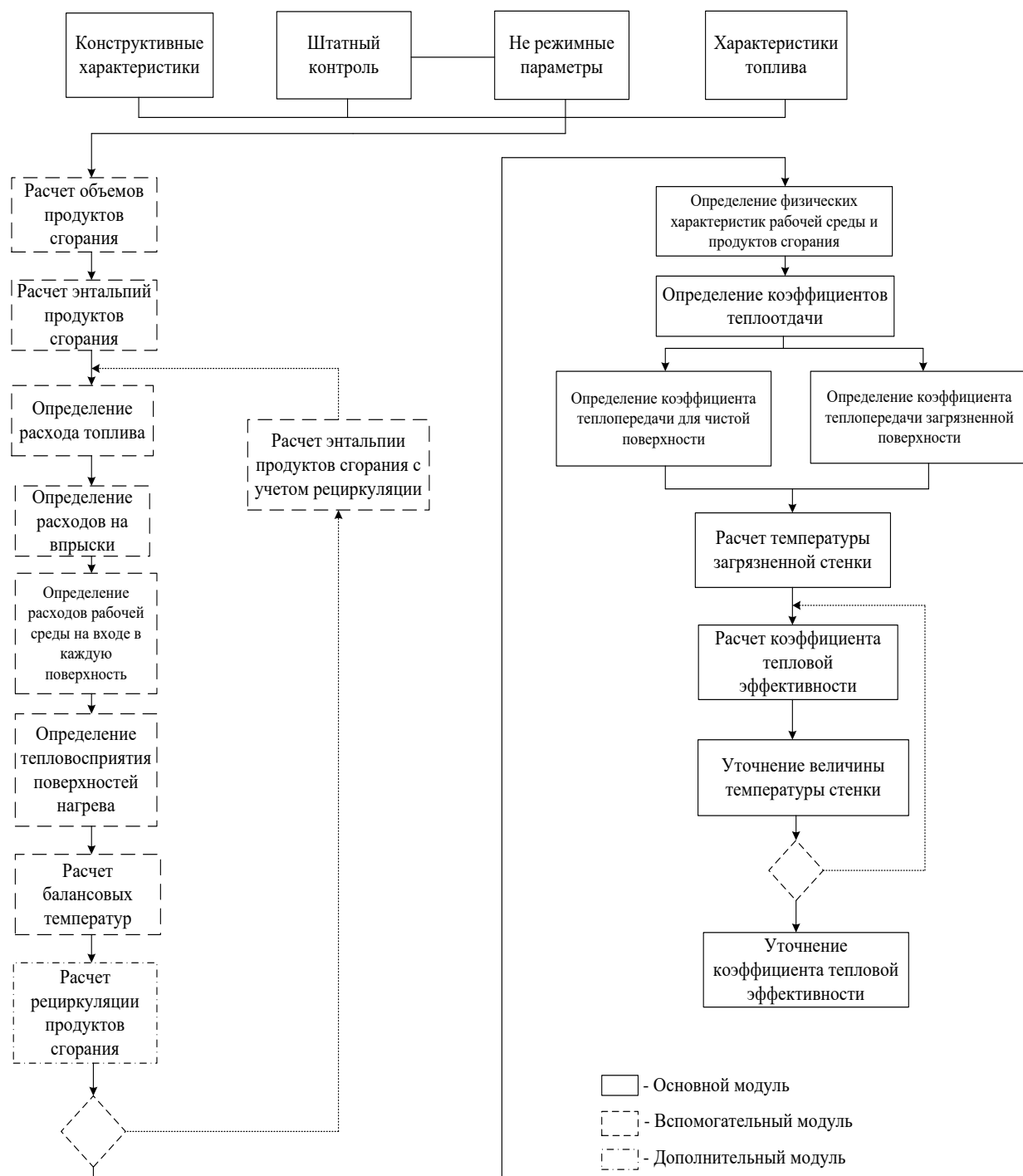


Рисунок 3.2 – Методика определения коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева котла

3.2 Формирование исходных данных, необходимых для определения интенсивности загрязнения полурадационных и конвективных поверхностей нагрева

В качестве исходных данных в основном используются режимные характеристики штатного контроля паровых котлов. В связи с этим эффективность разработанного метода определяется качественным и количественным подбором исходных данных, в связи с чем исходные данные были разделены на три группы:

1. Режимные параметры штатного контроля;
2. Конструктивные характеристики;
3. Дополнительные параметры.

К первой группе относятся параметры, представленные на щите управления котельного агрегата. Во вторую группу исходных данных входят конструктивные характеристики всех поверхностей нагрева котельного агрегата. В третью группу включены исходные данные, которые определяются с помощью специальных замеров с последующим построением зависимости полученных результатов от параметров штатного контроля.

Представлены требуемые исходные данные котла П-49 Назаровской ГРЭС для определения коэффициентов тепловой эффективности в режиме реального времени.

Необходимые конструктивные данные для расчета представлены в таблице 3.1. Эти данные вводятся один раз и изменяются в случае проведения реконструкции какой-либо из поверхностей нагрева.

Таблица 3.1 – Конструктивные данные для расчета

| № | Наименование | ШПП-1 | ШПП-2,3 | ШПП-4,5 | ШВП-3 | ШВП-2 | ШВП-1 | ЭКВД | ЭКНД | ВЗП-1,2 |
|----|-------------------------------------|-------|---------|---------|-------|-------|-------|------|------|---------|
| 1. | Поверхность нагрева, м ² | 1748 | 1560 | 1744 | 1668 | 2650 | 2650 | 9800 | 2170 | 16000 |
| 2. | Наружный диаметр труб, мм | 32 | 32 | 32 | 42 | 42 | 42 | 25 | 32 | 40 |
| 3. | Толщина стенки труб, мм | 7 | 7 | 7,5 | 4,5 | 3,5 | 3,5 | 4 | 1,5 | 1,5 |
| 4. | Поперечный шаг, мм | 972 | 504 | 504 | 252 | 242 | 242 | 64 | 72 | 52 |
| 5. | Продольный шаг, мм | 36 | 36 | 36 | 48 | 48 | 48 | 40 | 50 | 40 |

Под режимными данными понимается характеристика газового и пароводяного трактов, которые в свою очередь считаются со щита управления. В таблице 3.2 представлены необходимые режимные данные для расчета коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева для котла П-49, приведены результаты для чистых поверхностей. На рисунке 3.3 представлена основная часть расчета ширмового пароперегревателя 1 ступени, нахождение основных параметров, которые необходимы для определения коэффициентов тепловой эффективности в режиме реального времени.

Mathcad - [CPЧ и НАЗт.д..xmcd]

Файл Правка Вид Вставка Формат Инструменты Символьные операции Окно Справка

Normal Arial 9 B I U

Мой веб-узел Go

$$\begin{aligned}
 F_{шпп1} &:= 1748 \text{ м}^2 \\
 P_{шпп1вход} &:= 27 \text{ МПа} \\
 P_{шпп1выход} &:= 26.5 \text{ МПа} \\
 t_{входшпп1} &:= 434 \text{ C} \\
 t_{выходшпп1} &:= 475 \text{ C} \\
 h_{входшпп1} &:= 2860 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\
 h_{выходшпп1} &:= 3037 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \\
 D &:= 222.222 \\
 \varphi &:= 0.998 \\
 V_p &:= 39.351 \frac{\text{кг}}{\text{сек}}
 \end{aligned}$$

Количество теплоты отданное трубами из межтрубного пространства

$$Q_{6шпп1} := \frac{D}{V_p} \cdot (h_{выходшпп1} - h_{входшпп1}) = 999.55$$

$$N_{1шпп1266} := \frac{(N_{1шпп1300} - N_{1шпп1200}) \cdot 66}{100} + N_{1шпп1200} = 12400.78$$

$$N_{1шпп1174} := \frac{(N_{1шпп1200} - N_{1шпп1100}) \cdot 74}{100} + N_{1шпп1100} = 11402.415$$

$$k_{шпп1} := 29.6 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2\text{К}}$$

$$\Delta t_{шпп1} := \frac{Q_{6шпп1} \cdot 10^3 \cdot V}{k_{шпп1} \cdot F_{шпп1}} = 760.199 \text{ C}$$

Количество тепла, переданное через стенки труб за счет теплопередачи

$$Q_{тшпп1} := \frac{k_{шпп1} \cdot F_{шпп1} \cdot \Delta t_{шпп1}}{1000 \cdot V} = 999.55$$

по газам

$$Q_{6шпп1поГАЗАМ} := \varphi \cdot (N_{1шпп1266} - N_{1шпп1174}) = 996.367$$

Рисунок 3.3 – Основная часть расчета ширмового пароперегревателя 1 ступени

Таблица 3.2 – Основные, необходимые параметры для расчета коэффициента тепловой эффективности

| Поверхность нагрева | Коэффициент теплопередачи $k(\text{Вт/ М}^2 \cdot \text{К})$ | Температурный напор - Δt (С) | Площадь поверхности теплообмена - F (М ²) | Коэффициент теплоотдачи (Вт/ М ² · К) |
|---------------------|--|--------------------------------------|---|--|
| Топочная ширма | 204.3 | 818 | 380 | 18.6 |
| НРЧ | 150 | 1100 | 930 | 18 |
| СРЧ | 101.7 | 685 | 663 | 17.8 |
| ВРЧ | 58.5 | 550 | 480 | 17.8 |
| ШПП 1 | 29.6 | 761 | 1748 | 16.6 |
| ШПП 2,3 | 34 | 641.5 | 1560 | 15.4 |
| ШПП 4,5 | 35.1 | 455 | 1744.2 | 13.2 |
| ШВП 3 | 47 | 339 | 1668 | 14.6 |
| ШВП 2 | 32.7 | 303.5 | 2650 | 17.2 |
| ШВП 1 | 33.4 | 371 | 2650 | 17 |
| ЭК ВД | 49 | 212 | 9800 | 18.2 |
| ЭК НД | 63.5 | 201 | 2170 | 15.6 |
| ВЗП 1,2 | 40 | 99 | 16000 | 30.4 |

Схема газового тракта изображена на рисунке 3.4. Температуры газов по газовому тракту приведены в таблице 3.3.

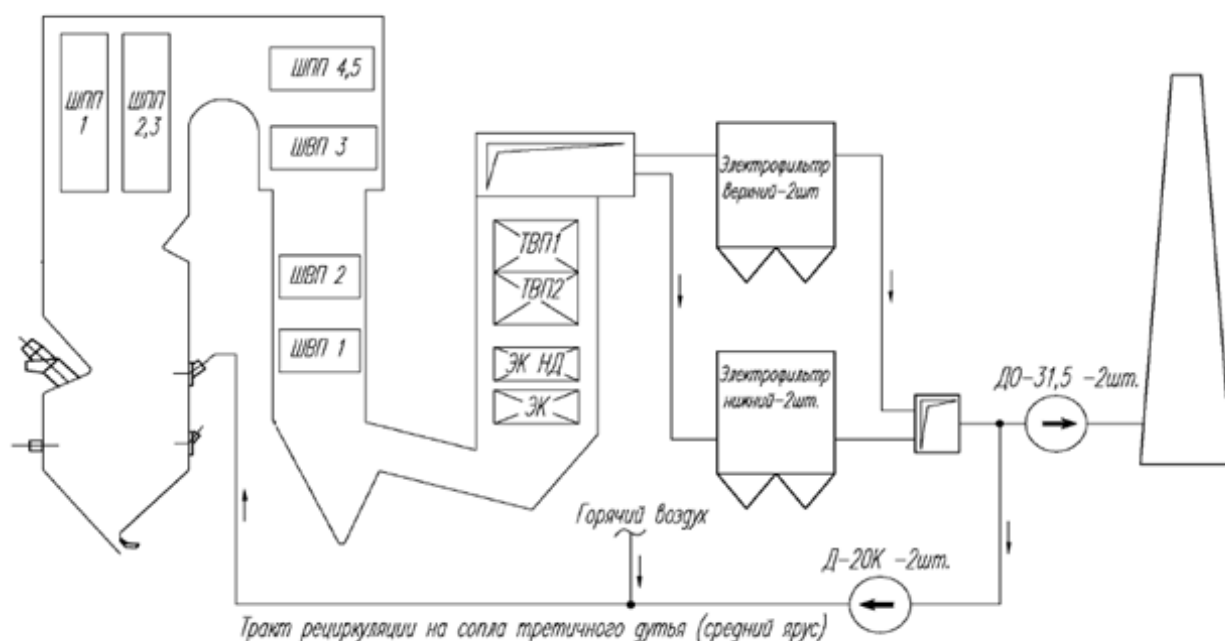


Рисунок 3.4 – Схема газового тракта

Таблица 3.3 – Температура газов по тракту

| Поверхность теплообмена | Нормативный расчет | Температуры после испытаний |
|---|--------------------|-----------------------------|
| На выходе из топки | 1190 | 1270 |
| За ШПП 3 | 1000 | 1095 |
| За ШПП 5 | 847 | 944 |
| За вторичным пароперегревателем 3 ступени (ШВП 3) | 751 | 816 |
| За вторичным пароперегревателем 2 ступени (ШВП 2) | 668 | 774 |
| За вторичным пароперегревателем 1 ступени (ШВП 1) | 585 | 692 |
| За экономайзером высокого давления (эк. ВД) | 349 | 385 |
| За экономайзером низкого давления (эк. НД) | 297 | 320 |
| За ТВП 1 | 164 | 165 |

Схемы пароводяных трактов приведены на рисунке 3.4. Температуры среды по тракту до и после каждой поверхности нагрева приведены в таблице 3.4.

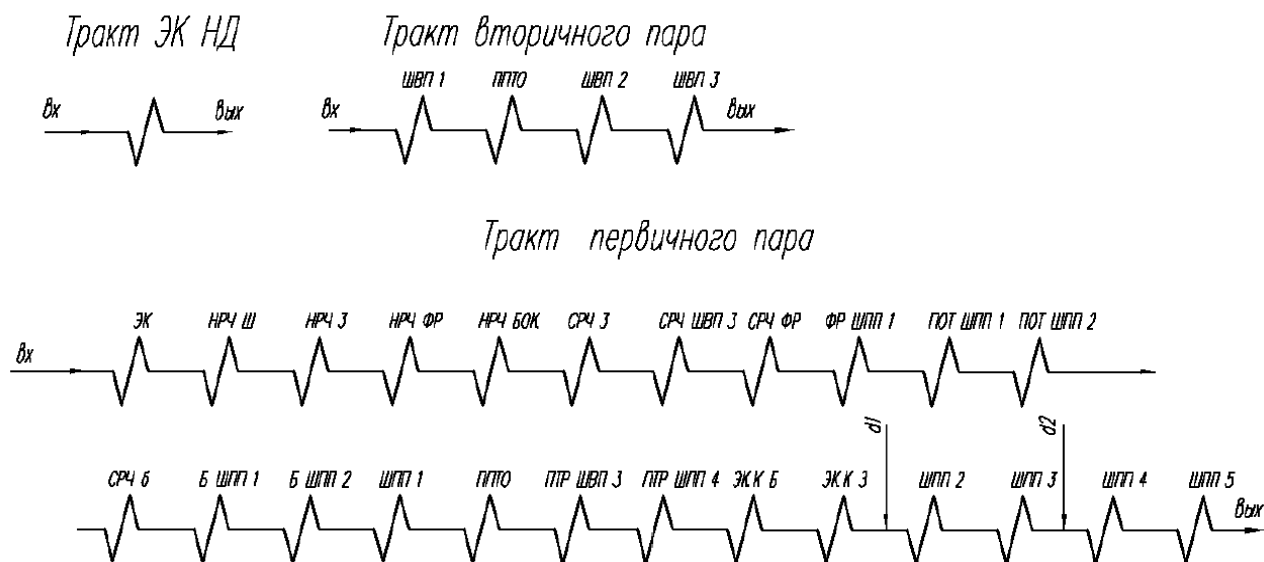


Рисунок 3.4 – Схемы пароводяных трактов

Таблица 3.4 – Температуры среды по тракту

| Поверхность нагрева | Температура среды по тракту |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Перед ЭК ВД | 249 |
| За ЭК ВД | 339 |
| За ширмами НРЧ | 377 |
| За задним экраном НРЧ | 393 |
| За фронтным экраном НРЧ | 401 |
| За боковым экраном НРЧ | 408 |
| За задним экраном СРЧ | 416 |
| За фронтным экраном СРЧ | 427 |
| За потолочным ПП | 434 |
| За боковыми экранами СРЧ | 443 |
| За ШПП 1 | 475 |
| За ППТО | 463 |
| За подвесными трубами конв. шахты | 465 |
| За боковыми экранами конв. шахты | 470 |
| За задним экраном конв. шахты | 480 |
| За ШПП 2 | 484 |
| За ШПП 3 | 511 |
| За ШПП 5 | 545 |
| Перед ШВП 1 | 302 |
| За ШВП 1 | 367 |
| За ППТО | 463 |
| За ШВП 2 | 482 |
| За ШВП 3 | 545 |
| Перед ЭК НД | 132 |
| За ЭК НД | 171 |
| Перед ТВП 1 | 45 |
| За ТВП 2 | 245 |

Основные параметры режимной работы котельного агрегата, зависящих от нагрузки котла, приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры режимной работы котельного агрегата

| | Наименование | Нагрузка котла, т/ч | | |
|---|---|---------------------|--------------------|--------------------|
| | | 793,5 пиковая | 700 номинальная | 490 минимальная |
| 1 | Расход топлива (полный) | 140,3 | 124,8 | 92,1 |
| 2 | Расход первичного пара | 793,5 | 700 | 490 |
| 3 | Давление первичного пара за котлом, МПа | 25,5 | 25,2 | 16,4 |

Продолжение таблицы 3.5

| | | | | |
|-----------------|--|--------|--------|-------|
| 4 | Температура первичного пара, С | 545 | 545 | 545 |
| 5 | Температура питательной воды, С | 249 | 241 | 223 |
| 6 | Расход вторичного пара, т/ч | 693,7 | 614 | 434 |
| 7 | Температура вторичного пара за котлом, т/ч | 545 | 545 | 545 |
| 8 | Давление вторичного пара перед котлом, МПа | 4,5 | 3,98 | 2,83 |
| 9 | Расход среды через ЭК НД, т/ч | 450 | 450 | 450 |
| 10 | Температура среды за ЭК НД, С | 171 | 165 | 158 |
| 11 | Давление среды за ЭК НД, МПа | 2 | 2 | 2,2 |
| 12 | Температура среды перед ЭК НД, С | 132 | 132 | 132 |
| Потери тепла, % | | | | |
| 13 | С уходящими газами | 8,01 | 7,793 | 8,996 |
| 14 | С химическим недожогом | 0 | 0 | 0 |
| 15 | С механическим недожогом | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 16 | В окружающую среду | 0,3 | 0,3 | 0,484 |
| 17 | С физическим теплом шлака | 0,016 | 0,014 | 0,013 |
| 18 | КПД котла расчетный | 91,174 | 91,393 | 90 |

4 Построение математической модели

4.1 Внешний вид программы оперативного контроля коэффициента тепловой эффективности

Для оперативного контроля тепловой эффективности поверхностей нагрева была разработана программа под котел П-49.

В качестве исходных данных для модели используются показания штатных приборов контроля по пароводяному и газовому трактам (рисунок 4.1).

Описание работы программы, методики применения и необходимых для нее исходных данных приведены в главе 3.

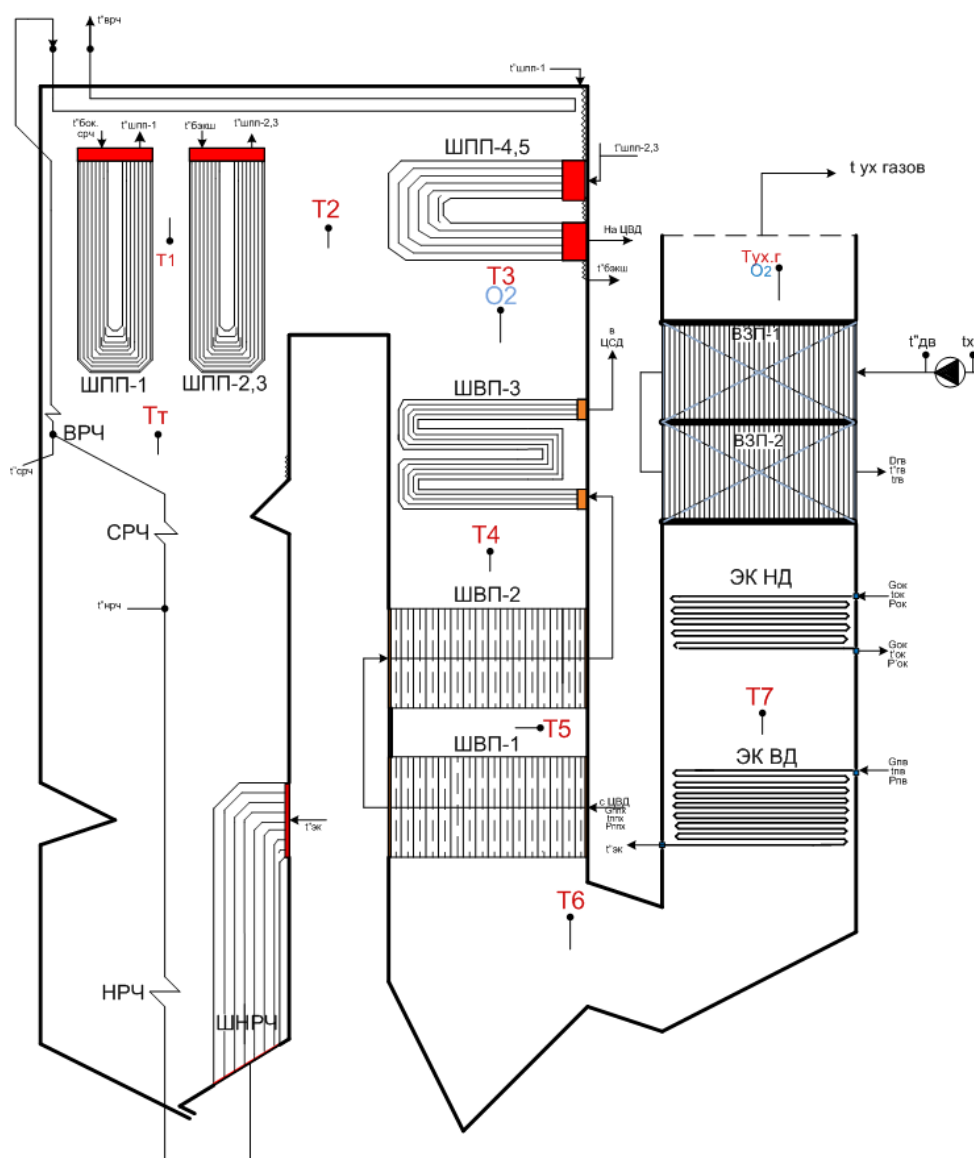


Рисунок 4.1 – Модель для контроля температур по пароводяному и газовоздушному тракту

На рисунке 4.2 наглядно изображен монитор, на котором представлен котельный агрегат и графики изменения основных параметров за определенное время.

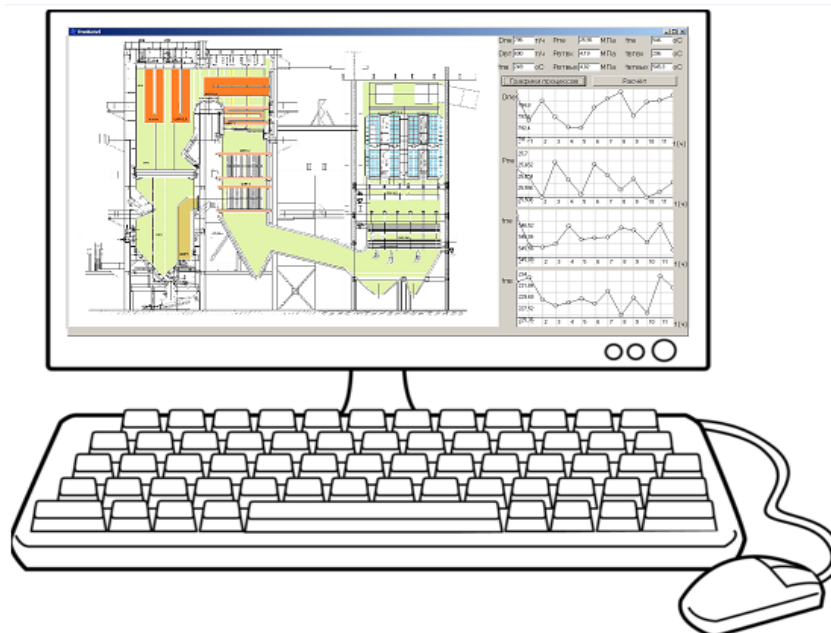


Рисунок 4.2 – Модель котельного агрегата и графики изменения основных параметров по времени

Оперативный персонал в любое время может подробно отследить температуры на входе и выходе, как по среде, так и по газам в необходимой поверхности нагрева. Что даст ясное представление о состоянии тепловосприятости поверхности нагрева, коэффициента загрязнения, коэффициента теплопередачи и т.д.

На примере, рассмотрим ШПП-1. Для того, чтобы открыть необходимую поверхность нагрева, требуется нажать кнопкой мыши на поверхность, далее более подробно можно рассмотреть изменение температур на входе и выходе по среде и по газам (рисунок 4.3), так же графики изменения этих температур. Тем самым, они наглядно демонстрируют загрязнение поверхности нагрева.

На рисунке 4.4 красным цветом выделен основной график, который наглядно показывает интенсивность изменения коэффициента тепловой эффективности по времени. При снижении его величины ниже 0,5 автоматически включаются системы очистки поверхности нагрева, поступает сигнал о автоматическом включении обдувочных аппаратов в работу для предупреждения оперативного персонала.

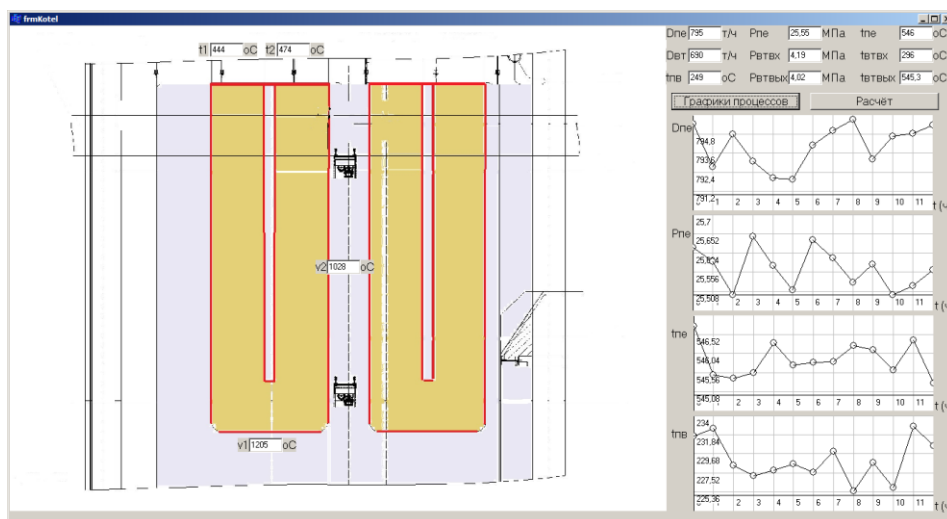
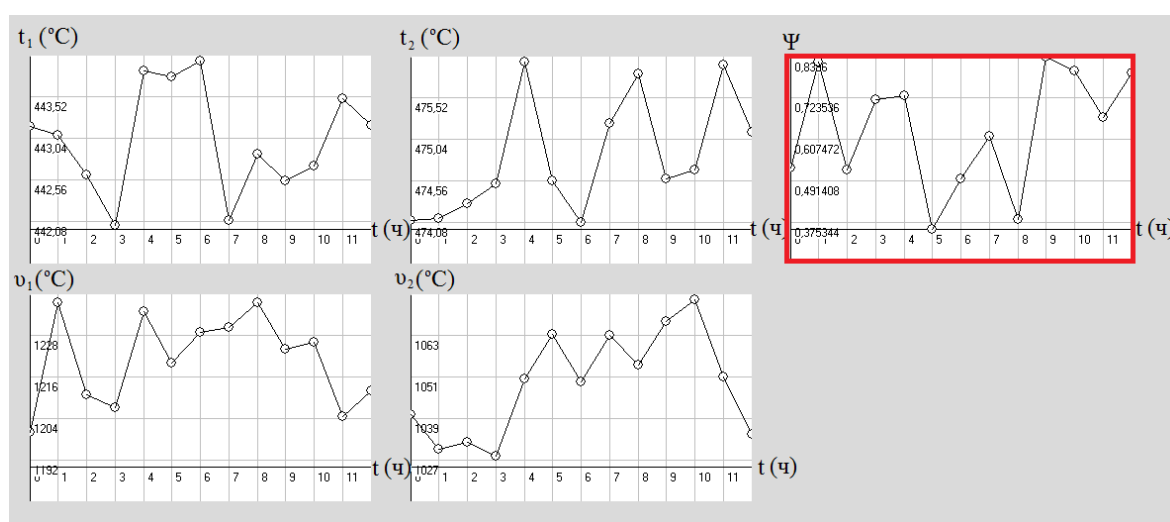


Рисунок 4.3 – Изменение температур по газам, по среде на входе и выходе из ШПП-1



4.4 – интенсивность изменения коэффициента тепловой эффективности по времени до включения обдувочных устройств и после

Основной задачей системы является не оценка абсолютной величины коэффициента тепловой эффективности (ψ), а определение динамики изменения данного коэффициента (рисунок 4.4). Данный алгоритм определяет отклонение ψ от нормированной величины. Если ψ снижается до 0,4, то система подает сигнал на включение аппарата очистки. Однако, перед включением аппаратов очистки, необходимо определить время последней очистки данной поверхности. В случае, если время последней обдувки превышает нормированную величину то, система подает команду на включения аппаратов очистки Допустимый интервал времени между обдувками определяется из условия не допущения износа металла труб поверхности нагрева вследствие интенсивного воздействия аппаратов очистки. Также значения данных параметров будут отображены на блоке управления, тем самым это позволит машинисту следить и выполнять действия по своим решениям.

Выводы по главе

Конструктивные и режимные особенности, как отдельной поверхности, так и котла в целом, обеспечивает адекватную оценку показателей тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольного парового котла П-49 Назаровской ГРЭС в составе 7-ого энергоблока.

На базе усовершенствованной методики и алгоритма был разработан перечень необходимых исходных данных, требуемых для определения уровня загрязнения и шлакования как отдельной поверхности нагрева, так и котла в целом.

На основе необходимых исходных данных выбрана методика проведения экспериментально-расчетных исследований для их получения.

Использование программного обеспечения в экспериментально-расчетных исследованиях позволит оценить изменения коэффициента тепловой эффективности, как поверхности в целом, так и отдельных ее элементов в зависимости от качества топлива, режимных параметров, очистки, состояния и состава вспомогательного оборудования парового котла. Все вышеперечисленное позволит создать банк данных значений коэффициентов тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева при сжигании широкого класса углей на котлах разных типов, практическое использование которого позволяет повысить точность определения площади поверхности нагрева с обеспечением необходимого регулировочного диапазона при создании новых, а также модернизации, реконструкции и наладке действующих паровых котлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана система технической диагностики для определения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева в режиме реального времени в части оценки коэффициентов теплопередачи чистой и загрязненной поверхности теплообмена, учитывающие конструктивные и режимные особенности, как отдельной поверхности, так и котла в целом, обеспечивающие адекватную оценку показателей тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольного парового котла П-49 Назаровской ГРЭС;

2. На основе простой методики разработано алгоритмическое и программное обеспечение для выполнения оперативной оценки интенсивности шлакования и загрязнения полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева парового котла в режиме реального времени, что позволит оптимизировать условия работы средств очистки и снизить затраты на проведение котлоочистных мероприятий, повысить экономичность и надежность работы оборудования;

3. Своевременное применение средств очистки полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева от наружных отложений в режиме реального времени при различных режимах работы котла, основанные на анализе данных оперативного контроля показателей тепловой эффективности до и после использования обдувочных аппаратов, что позволяет повысить надежность и экономичность эксплуатации котла, а также эффективность применяемых средств очистки;

4. Создание алгоритмического и программного обеспечения, интегрированного в АСУ ТП котла П-49 Назаровской ГРЭС, для текущей оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева позволит скорректировать работу средств очистки полурadiaционных поверхностей нагрева и сократить затраты на обдувку, примерно, на 300 тыс. руб/год. Применение алгоритмического и программного обеспечения для текущей оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла П-49 Назаровской ГРЭС влечет возможность сокращения периодичности проведения дробеочистки с 6 до 4 раз в сутки с обеспечением требуемой надежной работы котла. Сокращения числа циклов включения дробеочистки приведет к снижению годовых затрат на закупку дробы до 253 тыс. руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.В. Вихрев, Эксплуатационная надежность поверхностей нагрева паровых котлов / Ю. В. Вихрев // Мировая энергетика, 1997, № 4.– С. 38-40.
2. Массоперенос в топочных устройствах // Г.С. Прасолов М. : Энергия, 1964.–236 с.
3. Очистка поверхностей нагрева котельных агрегатов // Н.В. Кузнецов, Г.И. Лужнов, Л.И. Кропп. М. : Энергия. 1966.– 270 с.
4. Э.П. Дик, О влиянии топочного процесса на загрязнение поверхностей нагрева при сжигании канско-ачинских углей / Э.П. Дик, А.И. Филимонов // Теплоэнергетика, 1966. №2. – С 56-64
5. И.К. Лебедев, Особенности сжигания углей канско-ачинского бассейна в топках энергетических котельных агрегатов большой паропроизводительности : Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д-р техн. наук // И.К. Лебедев. Томск. 1971.– 43 с.
6. Поведение минеральной части твердого топлива в парогенераторах // И.С. Деринг. Красноярск. КрПИ. 1973.– 215 с.
7. Влияние минеральной части сибирских углей на загрязнение поверхностей нагрева парогенераторов // М.С. Шарловская, А.С. Ривкин. Новосибирск. Наука. 1973.– 242 с.
8. Влияние минеральной части энергетических углей на работу котлоагрегатов // М.И. Вдовенко, В.С. Бадакер, Н.Б. Киселев, Л.В. Москаленко. Алма-Ата. Наука. 1990.– 284 с.
9. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегатов // И.П. Эпик. Таллинн. Наука. 1961.– 270 с.
10. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей // А.А. Отс М. : Энергия. 1977.– 311 с.
11. А. Н. Алехнович, Прогнозирование и контроль шлакования котлов : Дис. др. техн. наук. // А. Н. Алехнович. Челябинск. 1995.– 68 с.
12. Е.Н. Некряч, Температурные условия преобразования минеральных примесей при пылевидном сжигании углей канско-ачинского бассейна : Автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук // Е.Н. Некряч Томск 1984.– 21 с.
13. В.Ю. Захаров, Ю.А. Рундыгин, В.В. Померанцев. Исследование кинетики первичных превращений ряда составляющих минеральной части твердого топлива // Сб. : Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. Таллинн 1980. С.– 35-41.
14. Ю.Л. Маршак, К расчету беспылевидных условий работы топочных камер с твердым шлакоудалением // Сб. : Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. Таллинн. 1974.– С 15-19.
15. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) // Под ред. Н.В. Кузнецова и др. М. : Энергия. 1973.– 295 с.

16. Проектирование топок с твердым шлакоудалением // Под ред. В.В. Митора, Ю.Л. Маршака. Л. : НПОЦКТИ. 1981.– 115 с.
17. С.Ю. Белов, О.Н. Едемский, О математической модели процесса загрязнения котельных поверхностей нагрева // Теплоэнергетика. 1985. – №6. С 45-52.
18. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) // Под ред. НПО ЦКТИ СПб. : 1998.– 256 с.
19. В.В. Васильев, П.Ю. Гребеньков, Тепловая эффективность конвективных поверхностей нагрева котлов при сжигании канско-ачинских углей // Сб. докл. международной научно-технической конференции: Эксплуатация и модернизация энергоблоков мощностью 800 МВт. Шарыпово, 2002.– С. 7282.
20. А.Н. Алехнович, Вероятностная модель формирования шлаковых отложений / А. Н. Алехнович // Электрические станции. 1995. –№ 2 С. 16. .
21. А.Н. Алехнович, Прогнозирование шлакующих и загрязняющих свойств углей / А. Н. Алехнович, В. В. Богомолов, В. Е. Гладков и др. // Электрические станции. 1998. – № 4. С 2-6.
22. А.А. Алехнович, Образование железистых отложений при сжигании углей с отличающимися железосодержащими минералами / А. А. Алехнович, В. Е. Гладков // Теплоэнергетика. 1989. – № 8. С 4-6.
23. А.Н. Алехнович, Характеристики минеральной части и шлакующих Минеральная часть топлив, шлакование, загрязнение и очистка котлов. Челябинск, 2001. – т. 1 С 19-32.
24. В.В. Богомолов, Выбор замещающего топлива для котлов блоков 500 МВт Рефтинской ГРЭС / В.В. Богомолов, А.Г. Жугрин ,А. Н. Алехнович, Н. В. Артемьева, А.Ю. Кузнецов // Сб. докл. международной научно-технической конференции: Технологии эффективного и экологического чистого использования угля. Москва, 2009. – С. 43-55.
25. Л.И. Пугач, Освоение головных и опытно-промышленных котельных установок при сжигании углей сибирских месторождений / Л. И. Пугач, Ф. А. Серант, А. Н. Волобуев и др. // Электрические станции. 1995. – № 11 С. 3-13.
Ф.А. Серант, Проблемы сжигания бурых углей и лигнитов при использовании мельниц-вентиляторов и пути их решения / Ф. А. Серант, В.Гордеев, Ю. А. Ершов, и др. // Теплоэнергетика. 1999. – № 9 С. 23-28.
31. М.Я. Процайло, Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канско-ачинских углей / М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак, М.С. Пронин и др. // Теплоэнергетика. 1988. – № 1 С. 5-12.
32. Г.Г. Ольховский, Оценка стоимость строительства и эксплуатации угольных ТЭС (на примере США) // Под ред. Г. Г. Ольховского. М. ОАО «ВТИ». 2008. – 44 с.
33. М. Н. Майданик, Очистка поверхностей нагрева котлов / М. Н. Майданик, В. В. Васильев // Электрические станции. 2006. – № 7 С. 29-32.

34. М.Н. Майданик, Результаты исследований паровой обдувки поверхностей нагрева котлов / М.Н. Майданик, В.В. Васильев, С.Ю. Белов // Электрические станции. 1998. – № 4 С. 15-16.
35. М.Н. Майданик, Водяная обдувка топочных экранов с использованием дальнобойных аппаратов / М.Н. Майданик, В.В. Васильев, Ю. П. Борисов и др. // Электрические станции. 1994. – № 4 С. 7-11.
36. Г.Г. Левицкий, Создание новых маловыдвижных аппаратов паровой и водяной очистки / Г.Г. Левицкий, М.Н. Майданик, В.В. Васильев / Тр. ЦКТИ № 248. Л., 1989. – С. 49-56.
37. М.Н. Майданик, Результаты испытаний маловыдвижного аппарата водяной обдувки топочных экранов / М. Н. Майданик, В.В. Васильев, Г. Г. Левицкий и др // Электрические станции. 1988. – №7 С. 26-30.
38. В.В. Васильев, Аппараты водяной и паровой очистки на рынке России / В. В. Васильев, А. Н. Алехнович // Сб. : Минеральная часть топлив, шлакование, загрязнение и очистка котлов. Челябинск. 2001.– т. 2 С. 31-35.
39. Л.Я. Еременко, Вопросы очистки поверхностей нагрева котлов / Л. Я. Еременко, В. И. Гришин, Г. Г. Левицкий и др. // Энергомашиностроение. 1988. – №6 С. 14-16.
40. С.В. Порозов, Системы очистки поверхностей нагрева фирмы «Клайд Бергеманн ГмбХ» / С. В. Порозов, А. Д. Александров, В. А. Котляревский // Тез. докл. Международного семинара : Опыт внедрения новой техники и технологий в энергетике. Шарыпово, 2003. – С. 25-28.
41. В.В. Васильев, Разработка и испытания дальнобойного, маловыдвижного аппаратов водяной очистки топки и глубоководных аппаратов паровой обдувки пароперегревателя / В.В. Васильев, А.В. Юдин, А.М. Бычков и др. // Сб. Всероссийской научно-практической конференции: Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях. Красноярск, 2000. – С. 61-67.
42. Методические указания по расчету и эксплуатации аппаратов водяной обдувки поверхностей нагрева паровых котлов (МУ 34-70-124-86). М. Н. Майданик, В.В. Васильев, Л.Ю. Воробьева, А.А. Отс. и др. М., 1985. – 60 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИ ПРОЦЕССОВ ШЛАКОВАНИЯ И
ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА П-49**
код программы системы технической диагностики

```

#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "main.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
TfrmKotel *frmKotel;
const int DneMin = 791;
const int DneMax = 796;
const double PneMin = 25.5;
const double PneMax = 25.7;
const int tneMin = 545;
const int tneMax = 547;
const int tnBMin = 225;
const int tnBMax = 234;
const int DBTMin = 590;
const int DBTMax = 670;
const int t1Min = 442;
const int t1Max = 444;
const int t2Min = 470;
const int t2Max = 471;
const int v1Min = 1190;
const int v1Max = 1240;
const int v2Min = 1050;
const int v2Max = 1075;
const double PBTBXMin = 4.19;
const double PBTBXMax = 4.21;
const double PBTBblXMin = 4.0;
const double PBTBblXMax = 4.03;
const int tBTBXMin = 295;
const int tBTBXMax = 299;
const int tBTBblXMin = 343;
const int tBTBblXMax = 346;
const double HyxMax = 1210;
const double HyxMin = 1190;
const double alphayx = 1.33;
const double Hyx = 1203;
const double HxB = 0;
const double QHP = 13575;
const double DHom = 800;
const double q3 = 0;
const double q4 = 0.5;
const double q6 = 0.016;
const double i = 3311;
const double h_BT = 3548;
const double hBT = 2960.5;
const double iBblX = 3037;
const double iBX = 2860;
const double F = 1748;
const double Kras = 29.6;
const double alpha1 = 13.565;
double times[] = {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12};
const int count = sizeof(times) / sizeof(double);
double t1[count];
double t2[count];
double v1[count];
double v2[count];
double Dne[count];
double Pne[count];
double tne[count];
double DBT[count];
double PBTBX[count];
double tBTBX[count];

```

```

double tnB[count];
double PBTBblX[count];
double tBTBblX[count];
double epsilon[count];
double psy[count];
double epsilonMin = 999999, epsilonMax = -999999, psyMin = 999999, psyMax = -
999999;
double random()
{
    int a = std::rand() % 100;
    return double(a) / 100;
}
double q2Fun()
{
    return (Hyx - alphayx * HxB) * (100 - q4) / QHP;
}
double q5Fun(double Dne)
{
    return 0.14 * DHom / Dne;
}
double nFun(double q2, double q5)
{
    return 100 - (q2 + q3 + q4 + q5 + q6);
}
double BpFun(double Dne, double DBT, double tnB, double n)
{
    return (Dne / 3.6 * (i - tnB * 4.19) + DBT / 3.6 * (h_BT - hBT)) / (QHP * n
/ 100);
}
double QFun(double Dne, double Bp)
{
    return Dne / 3.6 * (iBblX - iBX) / Bp;
}
double deltatbFun(double v1, double t1)
{
    return v1 - t1;
}
double deltatmFun(double v2, double t2)
{
    return v2 - t2;
}
double deltatFun(double deltatb, double deltatm)
{
    return (deltatb - deltatm) / std::log(deltatb/deltatm);
}
double KfFun(double Q, double Bp, double deltat)
{
    return Q * 1000 * Bp / (F * deltat);
}
double psyFun(double Kf)
{
    return Kf / Kras;
}
double epsilonFun(double Kf)
{
    return (alpha1 / Kf - 1) * alpha1;
}
double CoordTransform(double min, double max, double size, double value, bool
invert = false)
{
    if(invert)
        return (max - value) * size / (max - min);
    else

```

```

        return (value - min) * size / (max - min);
    }
    void Plot(TImage * image, double xMin, double xMax, double yMin, double yMax,
    double xAxis, double yAxis, int xSteps, int ySteps, int count, double * xValues,
    double * yValues)
    {
        double xAxisMin = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, xMin);
        double xAxisMax = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, xMax);
        double yAxisMin = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, yMin, true);
        double yAxisMax = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, yMax, true);
        double xZero = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, xAxis);
        double yZero = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, yAxis, true);
        image->Canvas->Pen->Color = 0xC0C0C0;
        for (int i = 0; i < count; i++)
        {
            double x = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, xValues[i]);
            double y = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, yValues[i], true);
            if(ySteps == 0)
            {
                image->Canvas->TextOutA(xZero + 4, y - 4, yValues[i]);
                image->Canvas->MoveTo(0, y);
                image->Canvas->LineTo(image->Width, y);
            }
            if(xSteps == 0)
            {
                image->Canvas->TextOutA(x + 4, yZero + 4, xValues[i]);
                image->Canvas->MoveTo(x, 0);
                image->Canvas->LineTo(x, image->Height);
            }
        }
        if(ySteps > 0)
        {
            double y = yMin;
            while (y < yMax)
            {
                double top = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, y, true);
                image->Canvas->TextOutA(xZero + 4, top + 4, y);
                image->Canvas->MoveTo(0, top);
                image->Canvas->LineTo(image->Width, top);
                y += (yMax - yMin) / ySteps;
            }
        }
        if(xSteps > 0)
        {
            double x = xMin;
            while (x < xMax)
            {
                double left = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, x);
                image->Canvas->TextOutA(left + 4, yZero + 4, x);
                image->Canvas->MoveTo(left, 0);
                image->Canvas->LineTo(left, image->Height);
                x += (xMax - xMin) / xSteps;
            }
        }
        image->Canvas->Pen->Color = 0;
        image->Canvas->MoveTo(xAxisMin, yZero);
        image->Canvas->LineTo(xAxisMax, yZero);
        image->Canvas->MoveTo(xZero, yAxisMin);
        image->Canvas->LineTo(xZero, yAxisMax);
        double x = CoorTransform(xMin, xMax, image->Width, xValues[0]);
        double y = CoorTransform(yMin, yMax, image->Height, yValues[0], true);
        image->Canvas->MoveTo(x, y);
    }

```

```

        for (int i = 0; i < count; i++)
        {
            double x = CoordTransform(xMin, xMax, image->Width, xValues[i]);
            double y = CoordTransform(yMin, yMax, image->Height, yValues[i], true);
            image->Canvas->LineTo(x, y);
            image->Canvas->Ellipse(x - 5, y - 5, x + 5, y + 5);
        }
    }

//-----
__fastcall TfrmKotel::TfrmKotel(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}

//-----
void __fastcall TfrmKotel::FormMouseMove(TObject *Sender,
    TShiftState Shift, int X, int Y)
{
    //Caption = IntToStr(X) + " " + IntToStr(Y);
}

//-----
void __fastcall TfrmKotel::imgKotelMouseUp(TObject *Sender,
    TMouseButton Button, TShiftState Shift, int X, int Y)
{
    if(X < 207 && X > 168 && Y > 70 && Y < 209)
    {
        imgKotel->SendToBack();
        txtt1->Visible = true;
        txtt2->Visible = true;
        txtv1->Visible = true;
        txtv2->Visible = true;
    }
}

//-----
void __fastcall TfrmKotel::imgKotel2Click(TObject *Sender)
{
    txtt1->Visible = false;
    txtt2->Visible = false;
    txtv1->Visible = false;
    txtv2->Visible = false;
    imgKotel->BringToFront();
}

//-----
void __fastcall TfrmKotel::FormCreate(TObject *Sender)
{
    srand(std::time(NULL));
    for(int i = 0; i < count; i++)
    {
        t1[i] = random() * (t1Max - t1Min) + t1Min;
        t2[i] = random() * (t2Max - t2Min) + t2Min;
        v1[i] = random() * (v1Max - v1Min) + v1Min;
        v2[i] = random() * (v2Max - v2Min) + v2Min;
        Dne[i] = random() * (DneMax - DneMin) + DneMin;
        Pne[i] = random() * (PneMax - PneMin) + PneMin;
        tne[i] = random() * (tneMax - tneMin) + tneMin;
        DBT[i] = random() * (DBTMax - DBTMin) + DBTMin;
        PBTBX[i] = random() * (PBTBXMax - PBTBXMin) + PBTBXMin;
        tBTBX[i] = random() * (tBTBXMax - tBTBXMin) + tBTBXMin;
        tnB[i] = random() * (tnBMax - tnBMin) + tnBMin;
        PBTBblX[i] = random() * (PBTBblXMax - PBTBblXMin) + PBTBblXMin;

        tBTBblX[i] = random() * (tBTBblXMax - tBTBblXMin) + tBTBblXMin;
        double q2 = q2Fun();
        double q5 = q5Fun(Dne[i]);
    }
}

```

```

        double n = nFun(q2, q5);
        double Bp = BpFun(Dne[i], DBT[i], tnB[i], n);
        double deltatb = deltatbFun(1203 /*v1[i]*/ , t1[i]);
        double deltatm = deltatmFun(1050 /*v2[i]*/ , t2[i]);
        double deltat = deltatFun(deltatb, deltatm);
        double Q = QFun(Dne[i], Bp);
        double Kf = KfFun(Q, Bp, deltat);
        epsilon[i] = epsilonFun(Kf);
        psy[i] = psyFun(Kf);
        if(epsilon[i] < epsilonMin)
            epsilonMin = epsilon[i];
        if(epsilon[i] > epsilonMax)
            epsilonMax = epsilon[i];
        if(psy[i] < psyMin)
            psyMin = psy[i];
        if(psy[i] > psyMax)
            psyMax = psy[i];
    }
//      (image, xMin, xMax, yMin, yMax, xAxis, yAxis, xSteps, ySteps, count,
xValues, yValues)
    Plot(imgDne, 0, 12, DneMin - 0.2 * (DneMax - DneMin), DneMax, 0, DneMin, 0,
5, count, times, Dne);
    Plot(imgPne, 0, 12, PneMin - 0.2 * (PneMax - PneMin), PneMax, 0, PneMin, 0,
5, count, times, Pne);
    Plot(imgtne, 0, 12, tneMin - 0.2 * (tneMax - tneMin), tneMax, 0, tneMin, 0,
5, count, times, tne);
    Plot(imgtnB, 0, 12, tnBMin - 0.2 * (tnBMax - tnBMin), tnBMax, 0, tnBMin, 0,
5, count, times, tnB);
}
//-----
void __fastcall TfrmKotel::btnSimulClick(TObject *Sender)
{
    frmPlots->Show();
    Plot(frmPlots->imgt1, 0, 12, t1Min - 0.2 * (t1Max - t1Min), t1Max, 0,
t1Min, 0, 5, count, times, t1);
    Plot(frmPlots->imgt2, 0, 12, t2Min - 0.2 * (t2Max - t2Min), t2Max, 0,
t2Min, 0, 5, count, times, t2);
    Plot(frmPlots->imgv1, 0, 12, v1Min - 0.2 * (v1Max - v1Min), v1Max, 0,
v1Min, 0, 5, count, times, v1);
    Plot(frmPlots->imgv2, 0, 12, v2Min - 0.2 * (v2Max - v2Min), v2Max, 0,
v2Min, 0, 5, count, times, v2);
    Plot(frmPlots->imgepsilon, 0, 12, epsilonMin - 0.2 * (epsilonMax -
epsilonMin), epsilonMax, 0, epsilonMin, 0, 5, count, times, epsilon);
    Plot(frmPlots->imgpsy, 0, 12, psyMin - 0.2 * (psyMax - psyMin), psyMax, 0,
psyMin, 0, 5, count, times, psy);
}
//-----
void __fastcall TfrmKotel::btnCalcClick(TObject *Sender)
{
    double Dne = StrToFloat(txtDne->Text);
    double Pne = StrToFloat(txtPne->Text);
    double tne = StrToFloat(txttne->Text);
    double DBT = StrToFloat(txtDBT->Text);
    double PBTBX = StrToFloat(txtPBTBX->Text);
    double tBTBX = StrToFloat(txttBTBX->Text);
    double tnB = StrToFloat(txttnB->Text);
    double PBTBblX = StrToFloat(txtPBTBblX->Text);
    double tBTBblX = StrToFloat(txttBTBblX->Text);
    double t1 = StrToFloat(txtt1->Text);
    double v1 = StrToFloat(txtv1->Text);
    double t2 = StrToFloat(txtt2->Text);
    double v2 = StrToFloat(txtv2->Text);
    double q2 = q2Fun();

```

```

double q5 = q5Fun(Dne);
double n = nFun(q2, q5);
double Bp = BpFun(Dne, DBT, tnB, n);
double deltatb = deltatbFun(v1, t1);
double deltatm = deltatmFun(v2, t2);
double deltat = deltatFun(deltatb, deltatm);
double Q = QFun(Dne, Bp);
double Kf = KfFun(Q, Bp, deltat);
double epsilon = epsilonFun(Kf);
double psy = psyFun(Kf);
ShowMessage("q2 = " + FloatToStr(q2) +
            "\nq3 = " + FloatToStr(q3) +
            "\nq4 = " + FloatToStr(q4) +
            "\nq5 = " + FloatToStr(q5) +
            "\nq6 = " + FloatToStr(q6) +
            "\nn = " + FloatToStr(n) +
            "\nBp = " + FloatToStr(Bp) +
            "\ndelta t á = " + FloatToStr(deltatb) +
            "\ndelta t ì = " + FloatToStr(deltatm) +
            "\ndelta t = " + FloatToStr(deltat) +
            "\nKf = " + FloatToStr(Kf) +
            "\nepsilon = " + FloatToStr(epsilon) +
            "\npsy = " + FloatToStr(psy)
);
}
//-----

```